

**PENGARUH *FEED RATE* TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA  
SAMBUNGAN LAS *DOUBLE SIDED FRICTION STIR WELDING*  
ALUMINIUM A6061**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**JUAN PRADIPTA  
NIM. 145060201111025**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2018**

**PENGARUH *FEED RATE* TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA  
SAMBUNGAN LAS *DOUBLE SIDED FRICTION STIR WELDING*  
ALUMINIUM A6061**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**JUAN PRADIPTA**

**NIM. 145060201111025**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada  
tanggal 18 Desember 2018

**Dosen Pembimbing I**

**Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.**  
**NIP. 19670518 199412 1 001**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Femiana Gapsari, ST., MT.**  
**NIP. 19820704 200812 2 002**

Mengetahui,  
**Ketua Program Studi S1**



**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.**  
**NIP. 19740930 200012 1 001**

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur penjiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-undang Nomor 20 Tahun 2003 Pasal 25 ayat (2) dan Pasal 70).

Malang, 19 Desember 2018

Mahasiswa,



Juan Pradipta

NIM. 145060201111025



**JUDUL SKRIPSI:**

**PENGARUH *FEED RATE* TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA SAMBUNGAN  
LAS *DOUBLE SIDED FRICTION STIR WELDING* ALUMINIUM A6061**

Nama Mahasiswa : Juan Pradipta  
NIM : 145060201111025  
Program Studi : Teknik Mesin  
Konsentrasi : Teknik Manufaktur

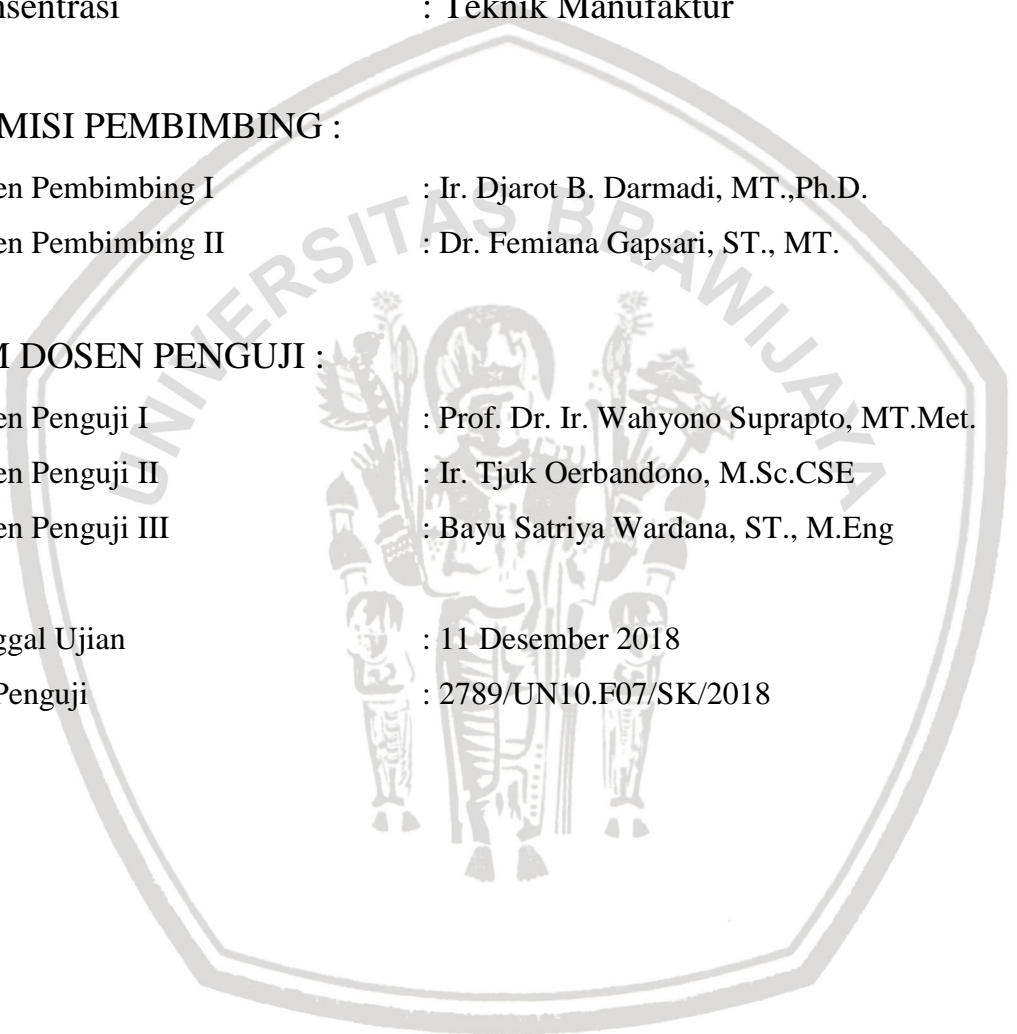
**KOMISI PEMBIMBING :**

Dosen Pembimbing I : Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D.  
Dosen Pembimbing II : Dr. Femiana Gapsari, ST., MT.

**TIM DOSEN PENGUJI :**

Dosen Penguji I : Prof. Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.  
Dosen Penguji II : Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE  
Dosen Penguji III : Bayu Satriya Wardana, ST., M.Eng

Tanggal Ujian : 11 Desember 2018  
SK Penguji : 2789/UN10.F07/SK/2018





**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**PROGRAM SARJANA**



## SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 176/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

**JUAN PRADIPTA**

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH FEED RATE TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA SAMBUNGAN LAS  
DOUBLE SIDED FRICTION STIR WELDING ALUMINIUM A6061**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan  
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **19 DEC 2018**



**Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D**  
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT**  
NIP. 19740930 200012 1 001



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat yang diberikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Pengaruh Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik Pada Sambungan Las Double Sided Friction Stir Welding Aluminium A6061”** dengan baik.

Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Setelah melalui berbagai tahapan, akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk segala dukungannya pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, motivasi, saran, serta masukan yang berharga bagi penulis selama mengerjakan skripsi.
2. Ibu Dr. Femiana Gapsari ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, motivasi, saran, serta masukan yang berharga bagi penulis selama mengerjakan skripsi.
3. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
4. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran administrasi.
5. Bapak Marco Talice Ph.D., yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu pengetahuan serta bantuan dalam mengerjakan simulasi *ansys fluent*.
6. Kepala dan asisten lab SPRS yang telah memberikan fasilitas dalam pembelajaran simulasi *ansys fluent*.
7. Bapak dan Ibu Dosen, serta karyawan Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan bimbingan, dan bantuan dalam administrasi selama masa studi yang dilalui penulis.
8. Papa, Mama, dan Deo yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, nasihat, teguran dan motivasi yang tak pernah henti.
9. Alberta PS atau Bee yang sering menemani disaat susah, senang dan selalu memberikan motivasi selama masa perkuliahan sampai penyelesaian skripsi.
10. Teman seperjuangan Jenno, Francius, Irvine yang selalu mengingatkan dan membantu selama proses penelitian

11. Seluruh teman-teman KMK yang sering memberikan dukungan, dan hiburan selama masa perkuliahan sampai penyelesaian skripsi.
12. Semua pihak yang sudah membantu selama masa perkuliahan hingga penyelesaian skripsi yang tidak dapat disebut satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca terhadap skripsi yang telah disusun demi perbaikan penelitian seperti ini di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut maupun pihak yang membutuhkan.

Malang, Desember 2018

Penulis



# DAFTAR ISI

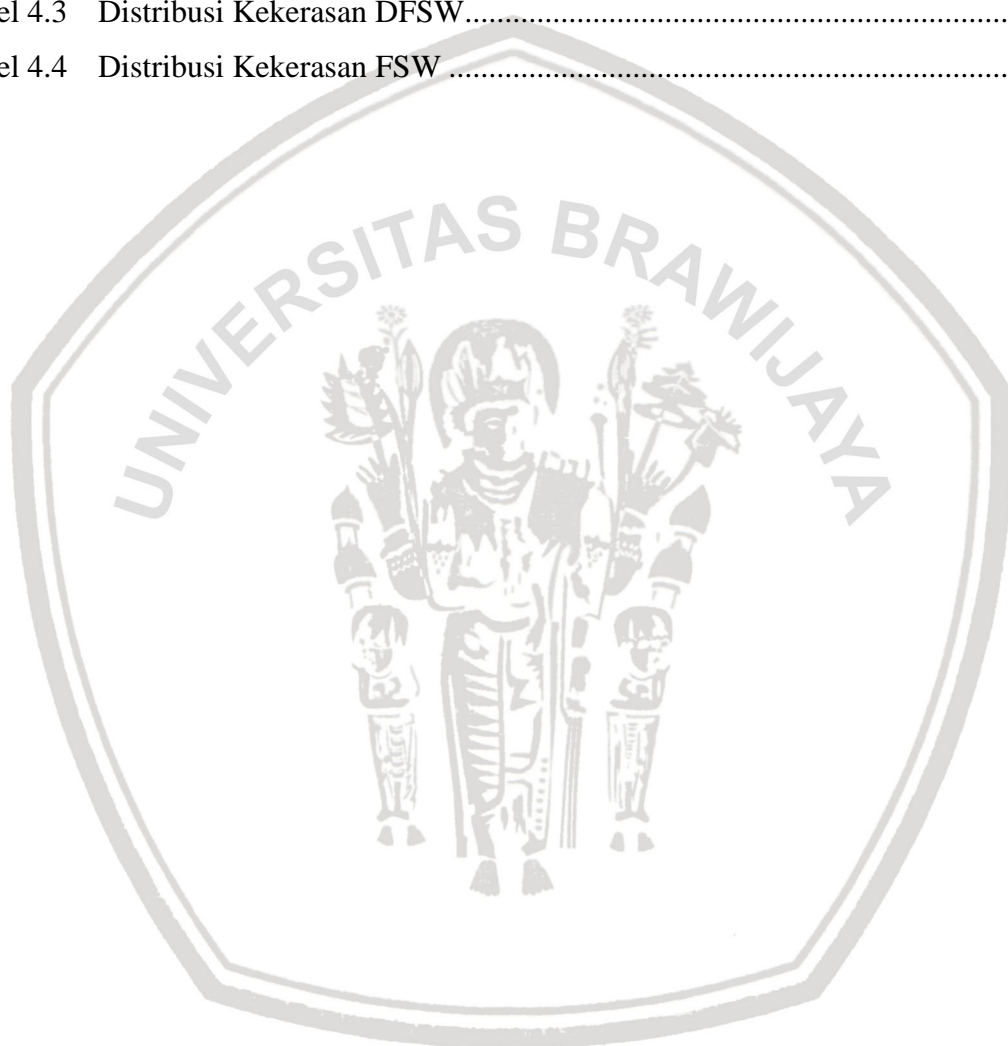
	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>SUMMARY</b> .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Aluminium .....	6
2.2.1 Klasifikasi Aluminium dan Paduan Aluminium.....	7
2.2.2 Sifat Mekanik Aluminium .....	8
2.2.3 Sifat Mampu-Las Aluminium.....	9
2.3 Pengertian Las .....	10
2.3.1 Definisi Pengelasan.....	10
2.3.2 <i>Friction Welding</i> .....	10
2.3.3 <i>Friction Stir Welding</i> .....	11
2.3.4 <i>Double Side Friction Stir Welding</i> .....	13
2.4 <i>Strain Hardening</i> .....	13
2.5 <i>Heat Input</i> .....	14
2.6 Parameter Pengelasan.....	15
2.7 Pengujian Tarik .....	16
2.8 Sambungan <i>Butt (Butt Joint)</i> .....	19
2.9 Hipotesis.....	20



<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	21
3.1 Metode Penelitian	21
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.3 Variabel Penelitian	21
3.3.1 Variabel Bebas	21
3.3.2 Variabel Terikat	22
3.3.3 Variabel Terkontrol	22
3.4 Alat dan Bahan	22
3.4.1 Alat	22
3.4.2 Bahan	27
3.5 Instalasi Penelitian	28
3.6 Prosedur Penelitian	28
3.6.1 Prosedur <i>Double Friction Stir Welding</i>	28
3.6.2 Proses Pengujian Kekuatan Tarik	29
3.6.3 Prosedur Pengujian <i>Mircohardness</i>	30
3.6.4 Prosedur Pengujian Mikrostruktur Hasil Sambungan	31
3.7 Rancangan Penelitian	31
3.7.1 Analisis Data	31
3.7.2 Analisis Grafik	31
3.8 Diagram Alir Penelitian	32
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	33
4.1 Data Uji Tarik Sambungan Las	33
4.2 Pembahasan	33
4.2.1 Hubungan Variasi <i>Feed Rate</i> Terhadap Kekuatan Tarik	33
4.2.2 Ditribusi Kekerasan	35
4.3 Data Pendukung	38
4.3.1 Analisis Foto Hasil Patahan DFSW Pengujian Kekuatan Tarik	38
4.3.2 Analisis Foto Hasil Patahan FSW Pengujian Kekuatan Tarik	39
4.3.3 Analisis Foto Mikrostruktur	40
<b>BAB V PENUTUP</b>	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sistem Penamaan Paduan Aluminium Berdasarkan Aluminium Association....	6
Tabel 3.1	Spesifikasi Mesin Universal X6328b .....	24
Tabel 3.2	Komposisi Aluminium A6061.....	27
Tabel 4.1	Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las DFSW .....	33
Tabel 4.2	Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las FSW .....	34
Tabel 4.3	Distribusi Kekerasan DFSW.....	35
Tabel 4.4	Distribusi Kekerasan FSW .....	36



## DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi cara pengelasan.....	10
Gambar 2.2	<i>Friction welding</i> .....	11
Gambar 2.3	<i>Friction stir welding</i> .....	12
Gambar 2.4	Daerah pengelasan fsw .....	13
Gambar 2.5	<i>Double sided friction stir welding</i> .....	13
Gambar 2.6	Fenomena <i>strain hardening</i> diagram tegangan – regangan.....	14
Gambar 2.7	Tipe <i>pin</i> dan <i>shoulder</i> .....	16
Gambar 2.8	Pengujian tarik .....	16
Gambar 2.9	Perubahan spesimen saat proses uji tarik.....	17
Gambar 2.10	Grafik tegangan –regangan.....	18
Gambar 2.11	Grafik metode offset .....	19
Gambar 2.12	<i>Butt joint</i> (a) dan (b) <i>Double-butt joint</i> .....	20
Gambar 3.1	Dimensi <i>tool</i> pengelasan.....	22
Gambar 3.2	<i>Tool</i> pengelasan .....	23
Gambar 3.3	Mesin <i>milling</i> .....	23
Gambar 3.4	Mesin pengujian tarik .....	25
Gambar 3.5	Mikroskop optik.....	26
Gambar 3.6	Alat uji kekerasan <i>micro vickers</i> Eseway EW-412AAT .....	26
Gambar 3.7	Dimensi spesimen (a) Sebelum pengelasan; (b) Setelah pengelasan.....	27
Gambar 3.8	Instalasi penelitian .....	28
Gambar 3.9	Dimensi spesimen uji tarik.....	30
Gambar 3.10	<i>Interval</i> titik kekerasan di <i>weld line</i> .....	30
Gambar 3.11	Diagram alir penelitian .....	32
Gambar 4.1	Grafik hubungan <i>feed rate</i> terhadap kekutan tarik sambungan las pada aluminium 6061 .....	34
Gambar 4.2	Distribusi kekerasan DFSW.....	36
Gambar 4.3	Distribusi kekerasan FSW.....	36
Gambar 4.4	Tampak samping patahan spesimen pengujian tarik dengan variasi <i>feed rate</i> (a) 24 mm/min; (b) 42 mm/min; (c) 55 mm/min; (d) 74 mm/min; (e) 98 mm/min.....	38



Gambar 4.5	Tampak samping patahan spesimen pengujian tarik dengan variasi <i>feed rate</i> (a) 24 mm/min; (b) 42 mm/min; (c) 55 mm/min ; (d) 74 mm/min; (e) 98 mm/min.....	39
Gambar 4.6	Struktur mikro IZ (a),(b) 24 mm/min (c),(d) 98 mm/min.....	40
Gambar 4.7	Struktur mikro TMAZ (a),(b) 24 mm/min, (c),(d) 98 mm/min .....	41
Gambar 4.8	Struktur mikro HAZ (a),(b) 24 mm/min, (c),(d) 98 mm/min .....	41



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Foto Struktur Mikro DFSW dan FSW Daerah IZ
Lampiran 2	Foto Struktur Mikro DFSW dan FSW Daerah TMAZ
Lampiran 3	Foto Struktur Mikro DFSW dan FSW Daerah HAZ
Lampiran 4	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik DFSW dan FSW
Lampiran 5	Hasil Pengujian Kekerasan FSW
Lampiran 6	Hasil Pengujian Kekerasan DFSW
Lampiran 7	Hasil Uji Komposisi



## RINGKASAN

**Juan Pradipta**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2018, Pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik pada sambungan las *double sided friction stir welding* aluminium A6061, Dosen Pembimbing: Djarot B. Darmadi dan Femiana Gapsari.

Pada saat ini industri manufaktur berkembang sangat pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan produk-produk manufaktur untuk menunjang perkembangan teknologi. Salah satu jenis proses manufaktur yang sering digunakan dalam industri adalah penyambungan logam dengan teknik pengelasan. Salah satu teknik pengelasan adalah *Friction Stir Welding* (FSW) dimana teknik penyambungan material yang pada umumnya memanfaatkan gesekan yang terjadi antara tool dengan benda kerja yang akan disambung. Untuk saat ini FSW memiliki metode pengelasan baru yaitu *Double Sided Friction Stir Welding* (DFSW).

Pada penelitian ini akan membahas tentang metode DFSW menggunakan metode *true experimental*. Penelitian ini melakukan proses pengelasan yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi *feed rate* 24 mm/min, 42 mm/min, 55 mm/min, 74 mm/min, dan 98 mm/min terhadap kekuatan uji tarik dengan menggunakan aluminium sebagai materialnya. Bentuk pin yang digunakan yaitu pin silinder dengan arah putaran (*clockwise*). Dari penelitian menunjukan kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi *feed rate* 24 mm/min dengan nilai rata-rata sebesar 90.57MPa. Pada pengujian kekerasan nilai kekerasan tertinggi juga pada variasi *feed rate* 24 mm/min. Pada hasil foto struktur mikro pada daerah *interference zone* memiliki butir yang lebih kecil dan halus dibandingkan dengan HAZ, dan TMAZ,

**Kata Kunci:** *Double Sided Friction Stir Welding*, *Feed Rate*, *Friction Stir Welding*, Kekerasan, Kekuatan Tarik,.



## SUMMARY

**Juan Pradipta**, Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, Desember 2018, Effect of feed rate on tensile strength on double sided friction stir welding aluminium A6061 welded joints, Consultant: Djarot B. Darmadi and Femiana Gapsari.

Today, manufacturing industry is developing very rapidly along with the increasing need for manufacturing products to support technological development. One type of manufacturing process that is often used in industry is connecting metal with welding techniques. One of the welding techniques is Friction Stir Welding (FSW) where the material is a connection technique that generally utilizes friction that occurs between the tool and the workpiece to be connected. For now FSW has a new welding method, namely Double Sided Friction Stir Welding (DFSW).

In this study we will discuss the DFSW method using the true experimental method. This study conducted a welding process that aims to determine the effect of feed rate variations 24 mm/min, 42 mm/min, 55 mm/min, 74 mm/min, dan 98 mm/min on the strength of the tensile test using aluminum as the material. The shape of the pin used is a cylinder pin with a clockwise direction. From the research, the highest tensile strength was obtained at a feed rate variation of 24 mm / min with an average value of 90.57 MPa. In the hardness test the highest hardness value is also in the feed rate variation of 24 mm / min. On the results of the microstructure in the interference zone area it has smaller and finer grains compared to HAZ, and TMAZ,

**Keywords:** Double Sided Friction Stir Welding, Feed Rate, Friction Stir Welding, Hardness, Tensile Strength,.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses manufaktur merupakan proses pembuatan bahan mentah menjadi suatu produk yang meliputi desain dan fabrikasi bahan dengan metode produksi dan teknik yang bervariasi. Pada dasarnya proses manufaktur terdapat beberapa proses yaitu, proses pemotongan (*cutting*), pengelasan (*welding*), pengecoran (*casting*), pembentukan (*forming*), dan lainnya (Sedyono, 2016). Semakin cepatnya perkembangan dunia dengan berbagai macam teknologi canggih dan berbagai macam mesin atau alat yang digunakan juga berkembang begitu pula pada dunia manufaktur seiring semakin meningkatnya persaingan, tuntutan permintaan produk-produk yang menunjang teknologi-teknologi tersebut. Pada saat ini proses pengelasan merupakan salah satu jenis proses manufaktur yang sering digunakan dalam industri, seperti industri perkapalan, manufaktur dan lainnya.

Pengelasan adalah salah satu proses penyambungan logam dengan memanfaatkan panas dimana sangat sering dilakukan pada sebuah industri terutama pada proses produksi. Secara umum terdapat dua jenis yaitu *fusion welding* dan *friction stir welding*. *Fusion welding* yang dilakukan, bagian logam dimana penyambungannya dipanaskan sampai lebih diatas titik lebur suatu material atau diatas titik *liquidus* untuk material paduan (Messler, 2004). *Fusion welding* memiliki berbagai macam pengelasan pada proses produksi yaitu pengelasan menggunakan *Shield Metal Arc Welding* (SMAW), *Metal Inert Gas* (MIG), *Tungsten Inert Gas* (TIG). *Solid state welding* dimana proses penyambungannya memanaskan material tetapi dibawah titik lebur suatu material, Salah satunya *Friction Stir Welding* (FSW). Pengelasan juga memiliki lingkup penggunaan yang sangat luas dalam kontruksi, meliputi perkapalan, jembatan, rangka baja, pipa pesat, dan lain sebagainya. Di samping untuk pembuatan, proses las juga dapat dipergunakan untuk perbaikan misalnya untuk mengisi lubang-lubang pada coran, membuat lapisan keras pada perkakas (Wiryusumarto, 2000). Las *welding* merupakan suatu cara untuk menyambung benda padat dengan jalan mencairkan melalui pemanasan dan penyambungan tersebut dikatakan berhasil diperlukan beberapa persyaratan didalamnya seperti cara penyambungan sesuai dengan sifat benda padat dan tujuan penyambungannya (Widharto, 2006).

Proses pengelasan memiliki beberapa metode tergantung pada penggunaan dan jenis material yang akan disambung, karena material yang berbeda mempengaruhi jenis

pengelasan yang digunakan. Salah satu jenis dan metode pengelasan yaitu *Friction Stir Welding* (FSW). Teknik pengelasan FSW merupakan teknik penyambungan material yang pada umumnya untuk menyambung material lembaran logam dengan memaksimalkan gesekan yang terjadi antara pin atau *probe* yang berputar dengan benda kerja sehingga terjadi pelelehan pada benda kerja yang mengakibatkan benda kerja tersebut tersambung menjadi satu, teknik pengelasan ini telah ditemukan dan dikembangkan Wayne Thomas pada tahun 1991 di *The Welding Institute* (TWI).

Prinsip kerja dari FSW berdasarkan gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan *pin* yang berputar dengan benda kerja yang diam dari gesekan tersebut menghasilkan panas yang mampu melelehkan benda kerja yang diam sebelum mencapai titik lelehnya sehingga benda kerja tersebut menyambung menjadi satu. Untuk saat ini FSW memiliki metode pengelasan baru yaitu *Double Sided Friction Stir Welding* (DFSW), prinsip kerja dari metode ini adalah gesekan antara *shoulder* dan *pin* yang berputar dilakukan didua sisi yaitu sisi atas dan sisi bawah dari benda kerja sehingga mampu melelehkan benda kerja dan panas yang dihasilkan lebih tinggi bila dibandingkan dengan FSW mengakibatkan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) juga lebih tinggi (Kumar, 2012).

Dalam FSW memiliki beberapa parameter pengelasan yang dapat mempengaruhi hasil kekuatan pengelasan, yaitu: kecepatan putaran spindel, *feed rate*, geometri pin, sudut pengelasan, dan jenis material *tool*. Pada penelitian ini mengkaji pengaruh parameter pengelasan yaitu *feed rate*. Parameter ini merupakan laju perjalanan dari benda kerja dalam mm/menit.

Menggunakan FSW dengan variasi *feed rate* menyatakan bahwa semakin rendah *feed rate* yang digunakan maka nilai kekuatan tarik yang dihasilkan juga semakin tinggi (Nurhafid, 2017). Dengan menggunakan *feed rate* yang rendah akan menghasilkan *heat input* yang tinggi sehingga mencapai suhu fase plastis lebih cepat dibandingkan dengan *feed rate* yang tinggi (Shalin, 2018). Apabila menggunakan *feed rate* yang tinggi panas yang masuk saat pengelasan rendah sehingga kedua logam tidak bisa menyatu dengan sempurna (Wijayanto dan Mujiarto, 2010). Penggunaan DFSW akan menghasilkan panas yang merata selama proses pengelasan dan tidak adanya panas yang hilang melalui *backplate*, hal ini memungkinkan untuk mengelas plat tebal (Chen, 2013). Sehingga hasil pengelasan DFSW memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan FSW (Kumar, 2012).

Aluminium merupakan jenis logam yang biasa digunakan dalam bidang industri dan biasa kita temukan dalam kehidupan sehari-hari seperti peralatan rumah tangga. Aluminium sendiri adalah logam yang ringan, memiliki ketahanan korosi yang baik dan memiliki kekuatan



yang relatif rendah dan lunak. Umumnya aluminium bila dicampur dengan logam lainnya membentuk aluminium paduan. Aluminium paduan menurut Wiryosumarto (2008), dibagi menjadi 7 jenis antara lain jenis Al murni, jenis Al-Cu, jenis Al-Mn, Al-Si, jenis Al-Mg, jenis Al-Mg-Si dan jenis Al-Zn.

Semua jenis aluminium paduan memiliki sifat, kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Salah satunya pada penelitian ini menggunakan jenis aluminium Al-Mg-Si atau dalam penamaannya sesuai dengan standar *Aluminium Association* yaitu Al dengan seri 6000, yang memiliki kelebihan jenis paduan yang dapat diperlaku-panaskan, memiliki sifat mampu las dan potong yang cukup baik, daya tahan terhadap korosi yang cukup baik. Bukan hanya kelebihan yang dimiliki tetapi juga terdapat kelemahan pada aluminium paduan seri 6xxx yaitu akan terjadi pelunakan pada daerah las akibat dari panas pengelasan, sehingga untuk mengetahui kebenaran dari sifat, kelebihan dan kelemahan tersebut digunakanlah aluminium dengan seri 6xxx atau Al 6061.

Terkait dengan yang disampaikan diatas, dibutuhkan penelitian lebih lanjut dengan metode pengelasan dengan DFSW. Maka pada penelitian ini membahas tentang pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik sambungan las pada pengelasan adukan gesek sisi ganda (DFSW) aluminium A6061.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan diatas, sehingga rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik pada sambungan las DFSW aluminium A6061.

## 1.3 Batasan Masalah

Penyusun membatasi masalah pada penelitian ini, yaitu:

1. Bahan yang digunakan adalah aluminum A6061.
2. Pengelasan dilakukan dengan las gesek adukan sisi ganda (DFSW).
3. Pengelasan dilakukan dengan mesin *milling universal*.
4. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kekuatan tarik.
5. Pengambilan data diasumsikan menggunakan instalasi pengambilan data serta pengujian yang terkalibrasi.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik pada sambungan las DFSW aluminium A6061.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memberikan manfaat, sebagai berikut.

1. Penelitian ini dapat dijadikan referensi pada penelitian yang serupa yaitu tentang DFSW
2. Memberikan pengetahuan dan informasi kepada peneliti mengenai DFSW
3. Menambah pengalaman dalam menganalisa tentang pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik pada sambungan las DFSW aluminium A6061



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Wijayanto dan Mujiarto (2010), penelitian yang berjudul "*friction stir welding/fsw* pada paduan aluminium seri 6061 dan 2024". Menyimpulkan variabel *feed rate* 50, 100, 150 mm/mnt dengan 1500 rpm, bahwa tegangan tarik terbesar terdapa pada *feed rate* 50 mm/mnt dan tegangan tarik terendah pada 150 mm/mnt, disebabkan karena dengan *feed rate* yang tinggi panas yang masuk saat pengelasan rendah sehingga kedua logam tidak bisa menyatu dengan sempurna.

Kumar (2012), dengan penelitian berjudul "*a comparative study of the mechanical properties of single and double sided friction stir welded aluminium joints*". Menyimpulkan bahwa hasil pengelasan menggunakan DFSW memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan FSW.

Chen (2013), judul penelitian "*fine grained mg-3al-1zn alloy with randomized texture in the double-sided friction stir welded joints*". Menyimpulkan bahwa penggunaan DFSW akan menghasilkan panas yang merata selama proses pengelasan dan tidak adanya panas yang hilang melalui *backplate*, hal ini memungkinkan untuk mengelas plat tebal.

S.Sedmak (2016), penelitiannya berjudul "*heat input effect of friction stir welding on aluminium alloy aa 6061-t6 welded joint*". Menyimpulkan dari hasil perhitungan dan percobaan bahwa dengan *rotational speed* tinggi dan *feed rate* yang rendah didapatkan *temperature maximal* yang tinggi dibandingkan dengan *rotational speed* rendah dan *feed rate* yang tinggi.

Nurhafid (2017), dalam penelitiannya berjudul "*analisis pengaruh perbedaan feed rate terhadap kekuatan tarik dan impak aluminium 6061 metode pengelasan friction stir welding*". Menyimpulkan dari variabel *feed rate* 30, 70, 100, dan 200 mm/mnt dengan 1500rpm, bahwa kekuatan tarik rata-rata tertinggi pada *feed rate* 70mm/mnt dan terendah pada *feed rate* 200mm/mnt. Hasil pengujian tarik dan impak memiliki kecenderungan semakin kecil *feed rate* yang digunakan semakin besar nilai kekuatan tarik dan impaknya.

Shalin (2018), judul penelitian "*experimental analysis on effect of tool transverse feed, tool rotational speed and tool pin profile type on weld tensile strength of friction stir welded joint of aa 6061*". Menyimpulkan pada FSW dengan *feed rate* yang rendah memiliki *heat*



*input* yang tinggi sehingga mencapai suhu fase plastis lebih cepat dibandingkan dengan *feed rate* yang tinggi.

## 2.2 Aluminium

Aluminium memiliki massa jenis dan titik lebur masing-masing  $2.70 \text{ kg/mm}^3$  dan  $660^\circ\text{C}$ . Pada umumnya aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik. Jika aluminium dicampur dengan logam seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Cr, sehingga membentuk aluminium paduan yang akan meningkatkan karakteristik aluminium seperti sifat mekanik, sifat mampu las, ketahanan korosi dan lainnya. Semua jenis paduan aluminium mengandung dua atau lebih unsur kimia yang mampu mempengaruhi sifat mekanik dari paduan tersebut. (ASM Metal Handbook Volume 9, 2004).

Berdasarkan standar Aluminium Association (AA), paduan aluminium diklasifikasikan menjadi dua kelas utama, yaitu aluminium tuang (*cast aluminium*) dan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*). Penamaan kedua kelas aluminium tersebut tergantung pada unsur paduan utama yang dikandungnya. Pada penelitian ini menggunakan *plate* aluminium A6061. Pada umumnya material aluminium dengan jenis 6xxx diaplikasikan alat-alat konstruksi dan automotif karena memiliki sifat mampu mesin, ketahanan korosi.

Tabel 2.1  
Sistem Penamaan Paduan Aluminium Berdasarkan Aluminium Association

Aluminium Tuang		Aluminium Pengerjaan	
Seri	Unsur Paduan	Seri	Unsur Paduan
1xxx	99,0% min. Al	1xxx	99,0% min. Al
2xxx	Al-Cu	2xxx	Cu
3xxx	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg	3xxx	Mn
4xxx	Al-Si	4xxx	Si
5xxx	Al-Mg	5xxx	Mg
7xxx	Al-Zn	6xxx	Mg dan Si
8xxx	Al-Sn	7xxx	Zn
		8xxx	Selain unsur diatas
		9xxx	Tidak digunakan

### 2.2.1 Klasifikasi Aluminium dan Paduan Aluminium

Pada saat ini paduan Al diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh beberapa negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang sedang terkenal dan sempurna adalah standar Aluminium Association di Amerika (AA) yang berdasarkan atas standar dahulu dari Alcoa (*Aluminium company of America*). Paduan aluminium ini dapat diklasifikasikan dalam tiga cara diantaranya berdasarkan pembuatan dengan klasifikasi paduan coran paduan tempa, berdasarkan perlakuan panas dengan klasifikasi, dapat dan tidak dapat diperlaku-panaskan dan cara ketiga yang berdasarkan unsur-unsur paduan. Berdasarkan dari ketiga klasifikasi ini aluminium dibagi dalam 7 jenis yaitu: jenis Al murni, jenis Al-Cu, jenis Al-Mn, Al-Si, jenis Al-Mg, jenis Al-Mg-Si dan jenis Al-Zn. (Wiryosumarto, 2008)

Sifat umum dari beberapa jenis paduan:

#### 1. Jenis Al-Murni teknik (seri 1000)

Kelebihan:

- a) Memiliki kemurnian antara 99,0% dan 99,9%
- b) Memiliki sifat yang baik tahan terhadap karat
- c) Memiliki konduksi panas dan listrik yang baik
- d) Mudah saat di las dan dipotong

Kelemahan:

- e) Memiliki kekuatan yang rendah

#### 2. Jenis paduan Al-Cu (seri 2000)

Kelebihan:

- a) Jenis aluminium yang dapat diperlaku-panaskan
- b) Sering digunakan dalam konstruksi keling dan konstruksi pesawat
- c) Menyamain sifat seperti baja lunak

Kelemahan:

- a) Daya tahan korosinya paling lemah diantara semua paduan Al
- b) Sifat mampu-las yang kurang baik.

#### 3. Jenis paduan Al-Mn (seri 3000)

Kelebihan:

- a) Hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya
- b) Memiliki sifat yang tahan terhadap korosi
- c) Sifat mampu las dan potong yang baik
- d) Memiliki kekuatan yang lebih unggul dari jenis Al-murni

Kelemahan:

- a) Tidak dapat diperlaku-panaskan.
- 4. Paduan jenis Al-Si (seri 4000)  
Kelebihan:
  - a) Jenis dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik.
  - b) Proses pembekuannya tidak terjadi retak.
  - c) Banyak digunakan dalam paduan cor dan paduan tempa.
 Kelemahan:
  - a) Jenis paduan yang tidak dapat diperlaku-panaskan.
- 5. Paduan jenis Al-Mg (seri 5000)  
Kelebihan:
  - a) Memiliki sifat yang baik tahan terhadap korosi, terutama korosi oleh air laut.
  - b) Memiliki sifat mampu-las yang baik.
 Kelemahan:
  - a) Paduan yang tidak dapat diperlaku-panaskan
- 6. Paduan jenis Al-Mg-Si (seri 6000)  
Kelebihan:
  - a) Jenis paduan yang dapat diperlaku-panaskan
  - b) Memiliki sifat mampu las dan potong yang cukup
  - c) Daya tahan terhadap korosi yang cukup
 Kelemahan:
  - a) Terjadinya pelunakan pada daerah las akibat dari panas pengelasan yang timbul.
- 7. Paduan jenis Al-Zn (seri 7000)  
Kelebihan:
  - a) Memiliki kekuatan tarik lebih dai  $50 \text{ kg/mm}^2$
 Kelemahan:
  - b) Sifat mampu lasnya kurang baik
  - c) Daya tahan korosi kurang

### 2.2.2 Sifat Mekanik Aluminium

Sifat-Sifat mekanik aluminium:

#### 1. Kekerasan

Kekerasan gabungan dari beberapa sifat yang terdapat dalam suatu bahan yang mencegah terjadinya suatu deformasi terhadap bahan tersebut ketika diaplikasikan suatu

gaya. Kekerasan dipengaruhi oleh plastisitas, viskoelastisitas, kekuatan tarik, dan sebagainya.

## 2. Kelenturan (*Ductility*)

Merupakan sifat dari suatu bahan untuk menerangkan seberapa jauh bahan dapat diubah bentuknya secara plastis tanpa terjadinya bentuk *necking*. Material dengan kelenturan yang tinggi akan mengalami *necking* yang kecil, sedangkan bahan yang memiliki kelenturan rendah, hampir tidak mengalami *necking*.

## 3. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik merupakan besar tegangan yang didapatkan ketika dilakukan pengujian tarik. Kekuatan tarik ditunjukkan oleh nilai tertinggi dari tegangan pada kurva tegangan-regangan hasil pengujian, dan biasanya terjadi ketika *necking*. Kekuatan tarik bukanlah ukuran kekuatan sebenarnya yang terjadi di lapangan namun dapat dijadikan sebagai acuan terhadap kekuatan bahan.

## 4. Daya Pemantulan (*Recyclability*)

Aluminium adalah reflektor yang baik dari cahaya serta panas, dan dengan bobot yang ringan, membuatnya ideal untuk bahan reflektor misalnya atap.

### 2.2.3 Sifat Mampu-Las Aluminium

Dalam pengelasan, paduan aluminium memiliki sifat yang kurang baik bila dibandingkan dengan baja. Beberapa sifat-sifat umum pengelasan pada aluminium.

1. Memiliki panas jenis dan daya hantar panas yang tinggi maka sukar sekali untuk memanaskan dan mencairkan sebagian kecil saja.
2. Paduan aluminium mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang mempunyai titik cair yang tinggi.
3. Mempunyai koefisien muai yang besar, sehingga mudah terjadinya deformasi.
4. Paduan aluminium mempunyai berat jenis yang rendah, sehingga banyak zat-zat lain yang terbentuk selama pengelasan akan tenggelam.
5. Memiliki titik cair dan viskositas yang rendah, maka daerah yang kena pemanasan mudah mencair dan jatuh menetes.

Selain itu pengelasan pada aluminium bisa terjadi retak las yang sebagian besar adalah retak panas. Biasanya retak las ini terjadi pada proses pembekuan dan pencairan. retak las pada proses pembekuan disebabkan karena adanya penyusutan logam yang membeku. Sedangkan retak yang terjadi pada proses pencairan disebabkan adanya pengendapan dari senyawa bertitik cair rendah.

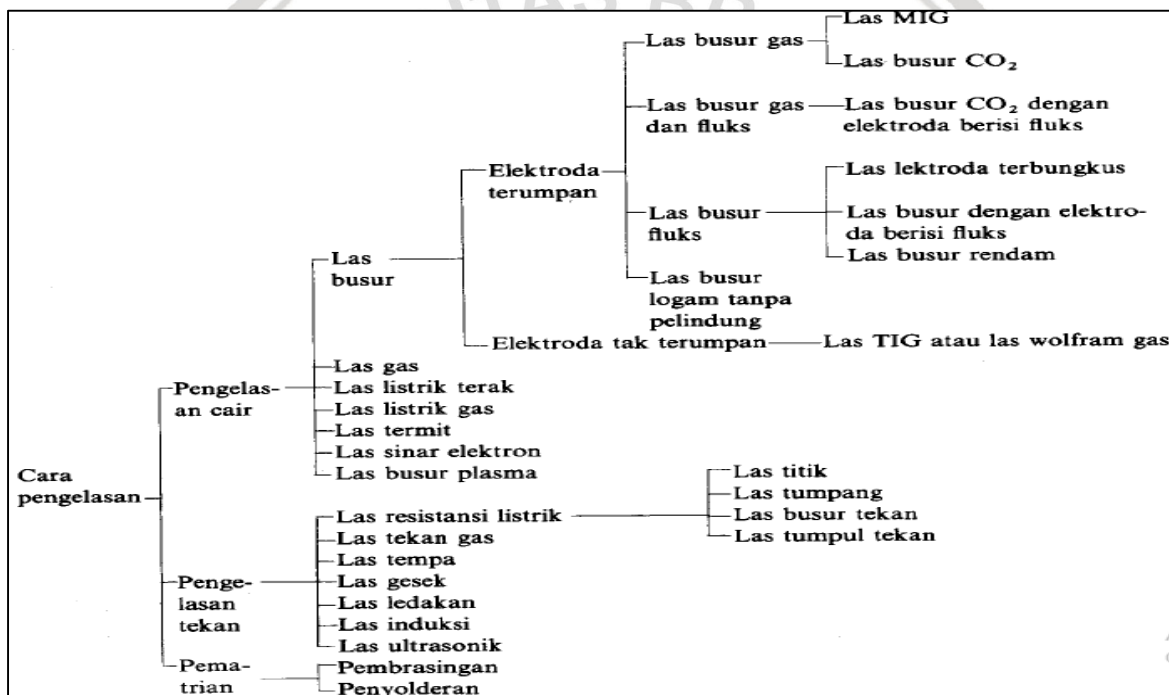


## 2.3 Pengelasan

### 2.3.1 Definisi Pengelasan

Pengelasan merupakan suatu ikatan metalurgi pada sambungan logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan cair menurut *Deutch Industries Normen* (DIN). Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las merupakan sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. (Wiryosumarto, 2008).

Proses pengelasan sendiri merupakan teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa adanya logam penambah dan menghasilkan sambungan yang kontinu. Terdapat banyak klasifikasi cara pengelasan pada saat ini, klasifikasi pengelasan dapat di lihat pada Gambar 2.1, untuk penelitian ini menggunakan cara pengelasan tekan yaitu *friction stir welding*.



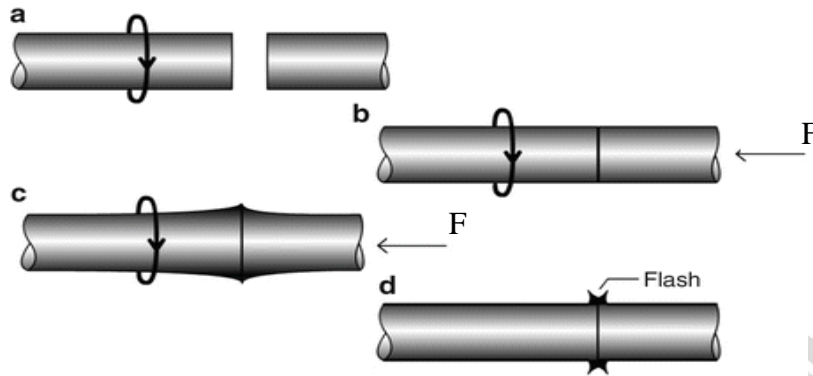
Gambar 2.1 Klasifikasi pengelasan

Sumber: Wiryosumarto (2008)

### 2.3.2 Friction Welding

*Friction welding* merupakan pengelasan tanpa menggunakan elektroda sehingga bisa dipastikan bahwa sambungan yang diperoleh antara kedua material yang dilas adalah sambungan yang homogen (Suratman, 2001). *Friction welding* juga bisa diartikan teknik pengelasan dengan memanfaatkan panas yang ditimbulkan akibat gesekan, dimana salah satu berputar dan benda lainnya diam, dan dikontakan oleh gaya tekan. Gesekan pada kedua

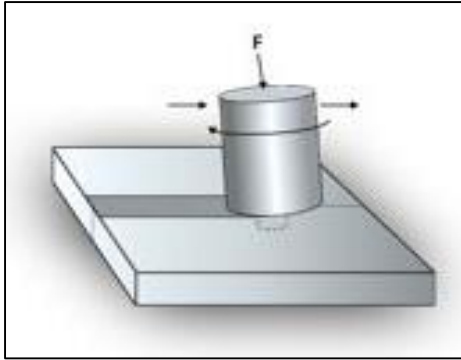
permukaan kontak dilakukan secara kontinu sehingga panas yang ditimbulkan oleh gesekan yang kontinu akan terus meningkat sampai mencapai suhu leleh/lebur dari kedua bahan. Setelah mencapai suhu lebur, kedua benda kerja selanjutnya didekatkan dengan gaya yang pas untuk membentuk ikatan secara metalurgi, dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Friction welding  
Sumber: Junfeng Guo (2013)

### 2.3.3 Friction Stir Welding

*Friction stir welding* ditemukan oleh Wayne Thomas di The Welding Institute, Inggris pada desember 1991. *Friction stir welding* pada Gambar 2.3 merupakan sebuah metode pengelasan gesek yang proses penyambungan dua logam tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi (Wijayanto, 2010). Panas yang digunakan untuk melunakan logam dihasilkan dari gesekan antara *pin* yang berputar dengan benda kerja yang diam. *Pin* yang digunakan pada pengelasan *friction stir welding* harus memiliki titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja, sehingga bisa menghasilkan las-an yang baik, dimana gesekan antara *pin* dengan benda kerja menimbulkan panas sampai lebih kurang 80% dari titik cair benda kerja. Pengelasan dengan FSW ini bisa digunakan untuk menyambungkan material yang sama (*similar metal*) atau material yang tidak sama (*dissimilar metal*). Prinsip FSW adalah dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya proses pengelasan gesek (Sudrajat, 2012). Parameter pengelasan harus diperhatikan dengan cermat, sehingga dapat memperkecil terjadinya pengurangan volume dari pin yang bergesekan dengan benda kerja. Hal tersebut bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan. Benda kerja harus dicekam secara kuat pada ragam untuk menjaga posisinya akibat gaya yang terjadi saat pengelasan.



Gambar 2.3 Friction stir welding

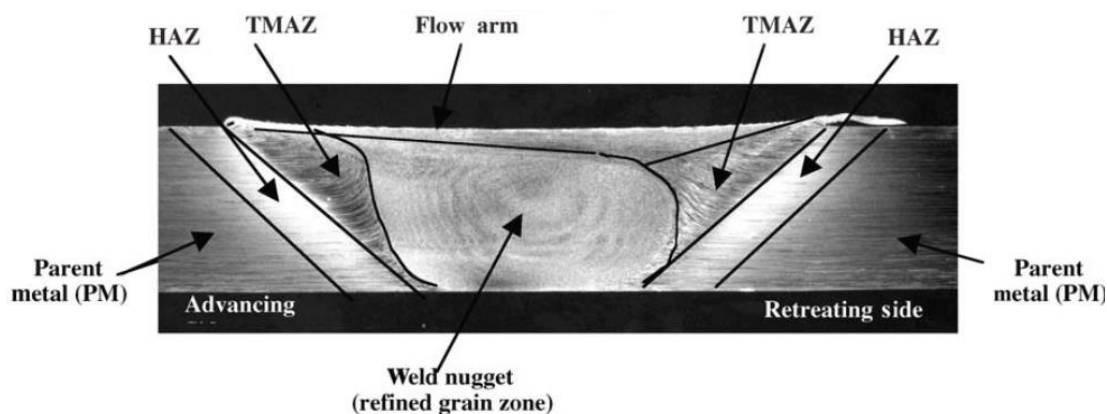
Sumber: MTI Welding Technologies (2017)

*Friction stir welding* memiliki beberapa keuntungan, diantaranya:

1. Dapat mengelas semua jenis aluminium
2. Tidak memerlukan bahan pengisi dan tambahan
3. Tidak menimbulkan gas
4. Tidak mengalami pelelehan selama pengelasan
5. *Tool welding* bisa digunakan secara berulang-ulang
6. Kekuatan las dari FSW baik

FSW dapat menghasilkan sambungan *butt joint*, sudut, *lap joint*, *spot*, dan *fillet* sehingga dapat digunakan untuk menyambung benda berongga diantaranya tanki, tabung, dan pipa. Gesekan antara putaran *tool* yang bergerak dengan benda kerja yang diam menghasilkan panas yang dapat menyebabkan perbedaan struktur pada sambungan las. Terdapat 4 perbedaan daerah pengelasan dilihat pada Gambar 2.4.

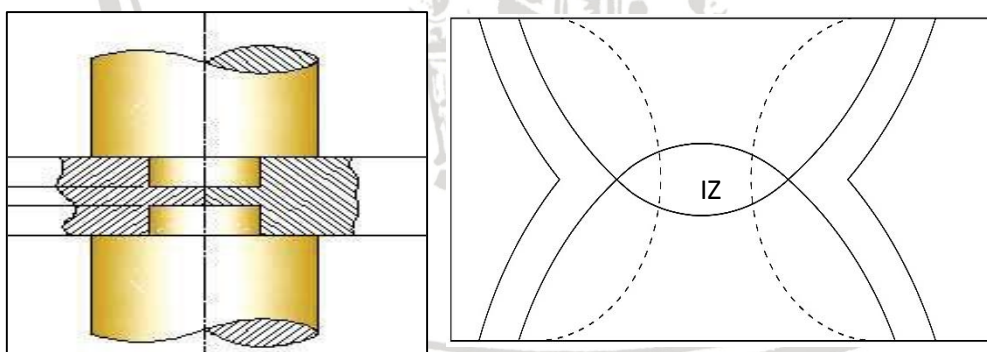
1. Logam lasan merupakan bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan membeku.
2. *Thermomechanically Affected Zone* (TMAZ) merupakan bagian yang mengalami deformasi plastis akibat panas yang dihasilkan dari gesekan *tool*. Meskipun mengalami deformasi plastis, pada bagian ini tidak mengalami rekristalisasi seperti halnya *weld nugget*.
3. *Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat.
4. Logam Induk/*Base Metal* merupakan bagian logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat.



Gambar 2.4 Daerah pengelasan fsw  
Sumber: ASM International (2007)

### 2.3.4 Double Side Friction Stir Welding

*Double sided friction stir welding* merupakan teknik dari *friction stir welding* yang menggunakan dua *tool* yang terletak dibagian atas dan bawah dari permukaan benda kerja tersebut. DFSW sudah diusulkan sejak tahun 1991. Apabila DFSW dibandingkan dengan FSW, panas yang dihasilkan lebih homogen dan tidak adanya panas yang hilang melalui *backplate* sehingga memungkinkan untuk mengelas plat tebal (Chen, 2013). Pada hasil sambungan DFSW dapat memiliki kekuatan sambungan lebih baik karena terjadi pengelasan berulang sehingga terbentuk IZ (*interference zone*). IZ merupakan daerah pertemuan *root* sambungan sisi ganda dimana terjadi pengelasan kembali pada daerah ini akibat pengelasan kedua menggunakan pin yang lebih dari setengah tebal pelat dilihat pada Gambar 2.5.



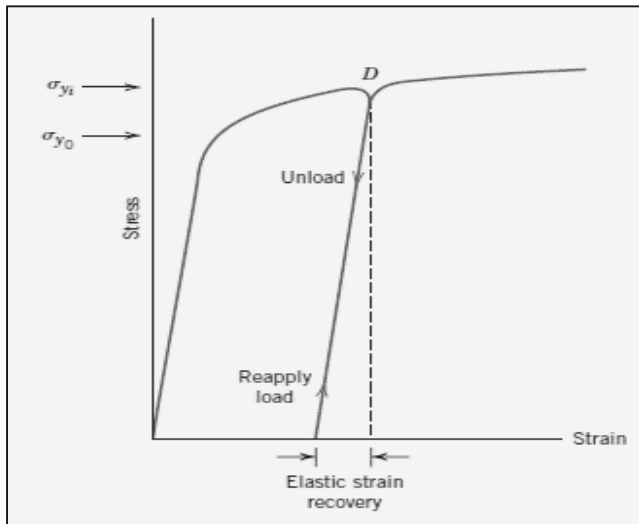
Gambar 2.5 Double sided friction stir welding  
Sumber: Kumar (2012)

### 2.4 Strain Hardening

*Strain hardening* merupakan suatu metode untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan material dengan deformasi plastis pada temperatur relatif rendah (Callister, 2007.p191). *Strain hardening* dapat dijelaskan pada Gambar 2.6, dimana *strain hardening* terjadi selama pengujian tarik. Material mengalami deformasi sampai titik *yield* sehingga terdeformasi



plastis, beban yang di lepaskan lalu diberikan kembali tetapi tidak akan menambah deformasi material karena terjadi resistansi sampai titik tertentu, namun pada titik pada titik *yield* yang baru material tersebut akan terdeformasi kembali. *Strain hardening* meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan mulur serta kekerasan material tetapi menurunkan *ductility* dari material.



Gambar 2.6 Fenomena *strain hardening* diagram tegangan – regangan

Sumber: Callister (2007)

*Strain hardening* terjadi akibat deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen) material, deformasi plastis ini menyebabkan terbentuknya dislokasi–dislokasi material yang berlipat ganda dan bertumpuk. Dislokasi yang bertumpuk ini menyebabkan pergerakan dislokasi semakin sulit apabila diberi gaya yang konstan, dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk mendeformasi material sehingga kekuatan logam akan naik.

## 2.5 Heat Input

Pin pada *tool* berfungsi untuk proses penetrasi kedalam material dan menghasilkan aliran material. *Heat input* merupakan panas yang terjadi saat proses pengelasan akibat dari gesekan antara *tool* dan benda kerja. Menurut Mishra (2005), mengatakan bahwa panas terbesar dihasilkan oleh akibat gesekan *tool shoulder* dengan benda kerja. Panas tersebut sangat mempengaruhi transformasi fasa yang selanjutnya akan berpengaruh pada struktur mikro, sifat fisik, dan sifat mekanik las. Untuk bentuk pin dan *shoulder* dapat dilihat pada gambar 3.1 dan 3.2. Maka, terdapat persamaan *heat input* sebagai berikut.

$$Q = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{contact}} (R_{\text{shoulder}}^3 + 3R_{\text{pin}}^3 H_{\text{pin}}) \quad (2-1)$$

Sumber: Lohwasser (2009)

dengan:

$$Q = \text{heat input (J/s)}$$

$R_{Shoulder}$	= Jari-jari <i>shoulder</i> (m)
$R_{pin}$	= Jari-jari <i>pin</i> (m)
$H_{pin}$	= Tinggi <i>pin</i> (m)
$\omega$	= Kecepatan putar <i>tool</i> (rpm)
$\tau_{contact}$	= untuk aluminium senilai 20 Mpa.

## 2.6 Parameter Pengelasan

Terdapat beberapa parameter dalam FSW dan dapat berpengaruh pada hasil pengelasan, diantaranya:

### 1. Rotasi tool dan kecepatan melintang

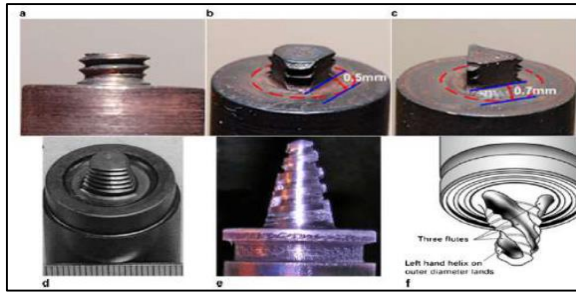
Ada 2 kecepatan yang harus diperhitungkan yaitu seberapa cepat *tool* berputar dan seberapa cepat *tool* melintasi jalur pengelasan. Umumnya dapat dikatakan bahwa ketika kecepatan rotasi meningkat dan kecepatan melintas berkurang maka titik las akan lebih panas. Jika material tidak tahan panas maka arus pelunakan tidak akan optimal sehingga terjadinya cacat rongga pada *stir zone*, dan tool akan rusak. Apabila input panas yang tinggi akan merugikan sifat akhir dari las-an karena perubahan karakteristik logam dasar material.

### 2. Kedalaman ceburan dan tekanan tool

Kedalaman ceburan (*plunge tool*) merupakan kedalaman titik terendah *probe* dibawah permukaan material yang dilas dan telah diketahui sebagai parameter yang menjamin kualitas las-an. *Plunge depth* yang dangkal dapat mengakibatkan cacat dalam las-an, sebaliknya bila *plunge depth* yang berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan pin karena berinteraksi dengan alasnya. Sedangkan tekanan *shoulder* diharapkan untuk menjaga material lunak tidak keluar jalur dan memberi efek tempa (*forging*). Dan tekanan *shoulder* dapat menghasilkan input panas tambahan.

### 3. Rancangan tool

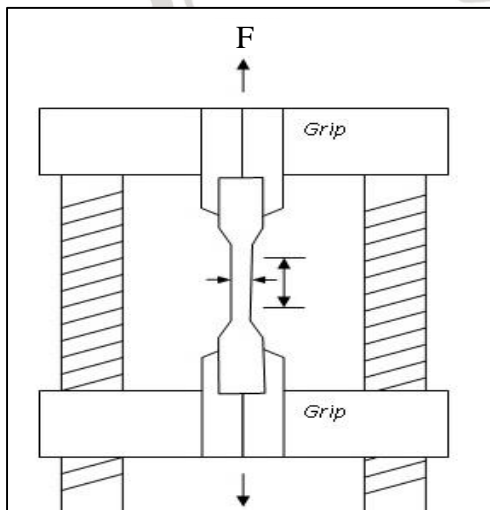
Rancangan *tool* merupakan faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena bila rancangan *tool* yang benar dapat meningkatkan kualitas las. Dari gesekan tool dan material yang akan dilas menghasilkan panas sekitar 70-80% dari titik lebur material las tersebut. *Desain tool* terdiri dari *shoulder* dan *pin*, seperti pada Gambar 2.7. *Pin* memiliki fungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. Sedangkan *shoulder* untuk memberi tekanan kebawah agar dapat memberi efek tempa pada lasan.



Gambar 2.7 Tipe *pin* dan *shoulder*  
Sumber: Sudrajat (2012)

## 2.7 Pengujian Tarik

Uji tarik merupakan suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban gaya yang sesumbu (Askeland, 2015). Uji tarik digunakan untuk mengetahui sifat mekanik bahan seperti kekuatan, keuletan, ketangguhan, modulus elastisitas dan sebagai uji spesifikasi bahan. Pada pengujian tarik spesimen yang umum digunakan adalah silinder pejal, namun dapat juga berbentuk plat dan tabung berdasarkan standar yang digunakan yaitu AWS, ASTM, JIS, dan DIN (Kalpakjian, 2009). Uji tarik juga mempelajari hubungan tegangan-regangan dari suatu logam, dimana kedua ujung Spesimen dijepit kemudian salah satu ujung dihubungkan dengan perangkat pengukur beban dari mesin uji dan ujung lainnya dihubungkan ke perangkat peregang. Spesimen ini diberikan gaya tarik yang searah sumbu secara kontinu dan akan mengalami pertambahan panjang dan pengurangan diameter pada spesimen tersebut, ilustrasinya dapat dilihat di Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengujian tarik  
Sumber: Mikell P. Groover (2011)

Kekuatan tarik suatu bahan dapat diketahui melalui pengujian tarik, kekuatan suatu bahan ditetapkan dengan membagi gaya maksimum dengan luas penampang mula-mula.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-2)$$

Sumber: Mikell P. Groover (2011)

dengan:

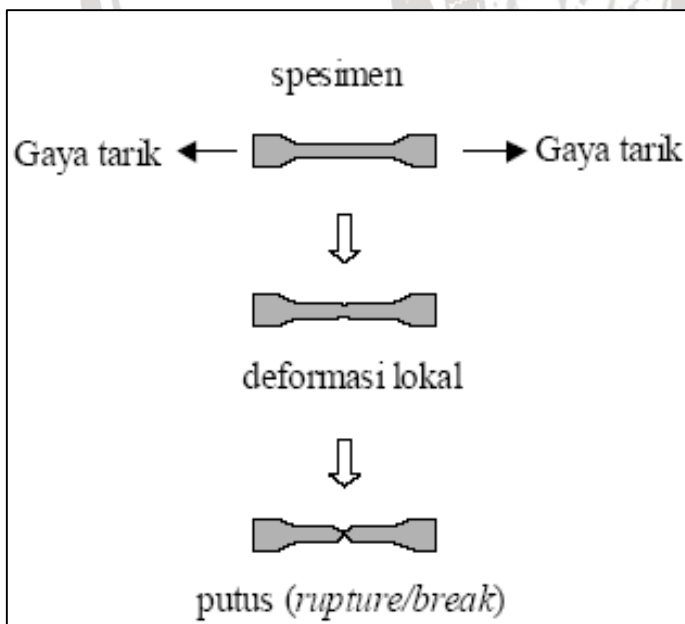
$\sigma$  = Tegangan tarik (N/mm<sup>2</sup>)

F = Beban tarik maksimum (N)

A = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

Dalam proses uji tarik *spesimen* mengalami beberapa tipe perubahan dilihat pada Gambar 2.9.

1. Pada awal uji tarik spesimen belum diberikan beban tarik
2. Spesimen diberikan beban tarik, mengalami pertambahan panjang yang seragam dan pengurangan luas penampang.
3. Pertambahan panjang tetap berlanjut, sampai beban yang diberikan maksimal
4. Ketika mencapai beban maksimal, spesimen mulai mengalami *necking* dan beban mulai menurun.
5. Spesimen patah.
6. Spesimen disatukan kembali untuk mengukur panjang akhir dari spesimen.



Gambar 2.9 Perubahan spesimen saat proses uji tarik

Sumber: Mikell P. Groover (2011)

Sedangkan pada Gambar 2.10 regangan merupakan pertambahan panjang yang diperoleh dari perbandingan antara pertambahan panjang ( $\Delta l$ ) dengan panjang awal pengukuran ( $l_0$ ) yang dapat dirumuskan:



$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

(2-3)

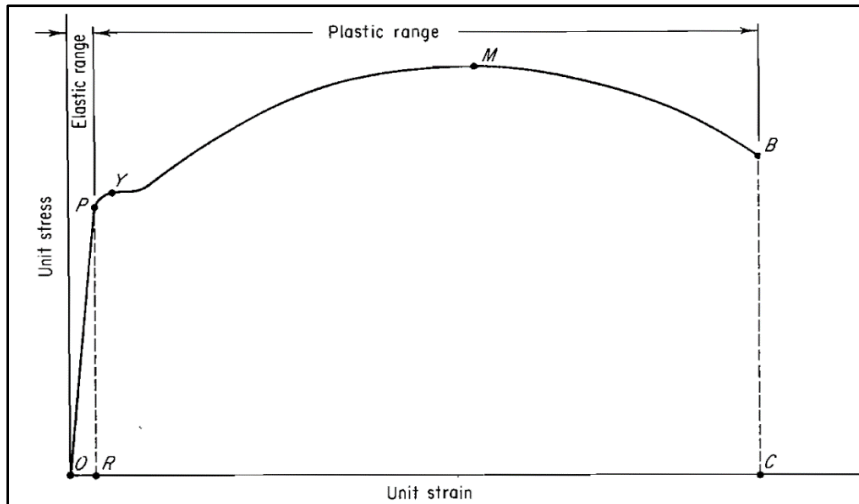
Sumber: Mikell P. Groover (2011)

dengan:

$\varepsilon$  = Regangan (%)

$l_0$  = Panjang awal (mm)

$\Delta l$  = Pertambahan panjang (mm)



Gambar 2.10 Grafik tegangan –regangan

Sumber: Callister (2011)

Berdasarkan Gambar 2.10 diatas dapat diketahui:

- Batas elastisitas  $\sigma_E$  (Elastis limit)  
Daerah terjadiya deformasi elastisitas, yang dimulai dari titik nol sampai batas (P) proporsional.
- Batas proporsional  $\sigma_P$  (P)  
Batas proporsional sama dengan batas elastis, yang mana merupakan keseimbangan antara pertambahan tegangan dan regangan.
- Deformasi plastis (*Plastic deformation*)  
Yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula ketika material dikenai gaya. Pada gambar diatas, material di tarik sampai melewati batas proposional dan mencapai daerah landing.
- Tegangan luluh (*Yield Stress*)  
Merupakan tegangan maksimum sebelum bahan mencapai fase plastis, atau peralihan deformasi elastis ke plastis.
- Regangan luluh  $\varepsilon_y$  (*Yield Strain*)  
Regangan permanen saat bahan akan memasuki fase deformasi plastis.

- Regangan elastis  $\epsilon_e$  (*Elastic Strain*)

Regangan yang diakibatkan perubahan elastis bahan. Pada saat beban dilepaskan regangan ini akan kembali ke posisi semula.

- Regangan plastis  $\epsilon_p$  (*Plastic Strain*)

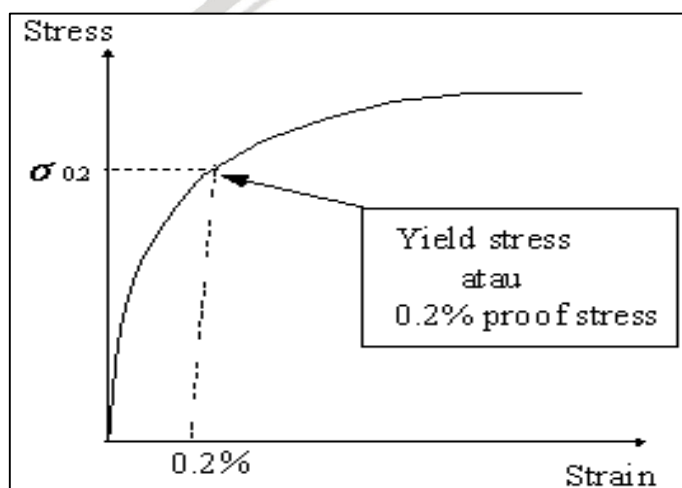
Regangan yang diakibatkan perubahan plastis bahan. Pada saat beban dilepaskan regangan ini tetap tinggal sebagai perubahan permanen bahan.

- Tegangan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

Pada gambar diatas, ditunjukkan dengan titik M ( $\sigma_b$ ) merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

- Patah (*Breaking Strength*)

Titik terjadinya patah pada spesimen.



Gambar 2.11 Grafik metode *offset*

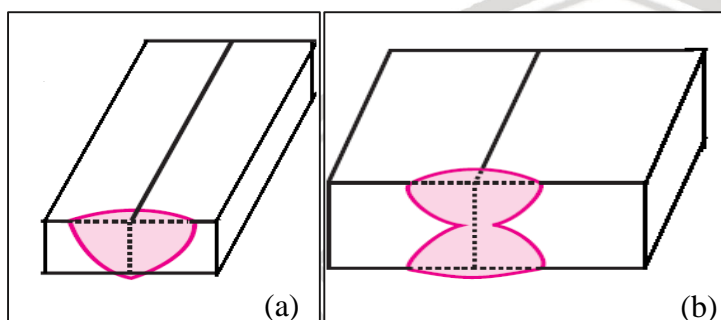
Sumber: Bondan T. Sofyan (2010)

Apabila suatu proses material dihasilkan dengan tegangan-regangan yang tidak memperlihatkan titik luluh/*yield*, maka mencarinya dengan metode *offset* pada Gambar 2.11, yaitu menarik garis lurus sejajar dengan diagram tegangan dimulai dari titik 0 regangan yang digunakan sebagai acuan dengan jarak 0,2% dari regangan maksimum. Perpotongan garis *offset* dengan kurva tegangan regangan itulah tegangan *yield* dari bahan tersebut.

## 2.8 Sambungan Butt (*Butt Joint*)

Sambungan *butt joint* merupakan jenis sambungan tumpul, dimana dua benda kerja berada pada bidang yang sama dan disambung pada ujung kedua benda kerja yang saling berdekatan. Dalam proses pengelasannya dua benda kerja dicekam oleh ragum yang bertujuan untuk mencegah benda kerja bergeser atau terangkat, setelah itu *tool* perlahan masuk kedalam ruas pertemuan benda kerja tersebut sampai *shoulder* dari *tool* menyentuh

permukaan benda kerja dan ujung pin sedekat mungkin dengan landasan benda kerja atau *backplate*. Sampai akhir pengelasan *tool* diangkat ketika *tool* dalam keadaan tetap berputar, dan akan meninggalkan lubang pada ujung sambungan. biasanya sambungan ini bias dihasilkan dengan pengelasan FSW namun pada penelitian ini menggunakan pengelasan DFSW atau pengelasan sisi ganda yang memiliki prinsip kerja hamper sama dengan FSW dihasilkan sambungan *double butt joint* dan menurut penelitian McPherson (2012) memiliki sambungan yang lebih baik karena akibat dari penetrasi *tool* yang jauh lebih kedalam pelat dan menghasilkan ikatan metalurgi yang lebih baik. Pada Gambar 2.12 adalah ilustrasi dari *butt joint* dan *double butt joint*.



Gambar 2.12 Butt joint (a) dan (b) Double-butt joint  
Sumber: Minnick (2013)

## 2.9 Hipotesis

Variasi *feed rate* dapat memberikan pengaruh pada kekuatan las pada aluminium, dengan menggunakan teknik DFSW panas yang dihasilkan lebih tinggi akibat pengelasan pada dua sisi atau pengelasan berulang. Semakin rendah *feed rate* menghasilkan *heat input* yang tinggi, Hal ini menyebabkan logam mencapai suhu fase plastis lebih cepat sehingga terbentuk deformasi plastis merata dan mengalami *strain hardening* sehingga kekuatan tarik yang dihasilkan semakin tinggi.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode *true experimental* yaitu penelitian dilakukan secara langsung pada spesimen yang akan diteliti. Tujuan dari menggunakan metode tersebut untuk mengetahui secara langsung pengaruh *feed rate* terhadap kekuatan tarik pada sambungan las DFSW aluminium A6061, hal ini didasari dari berbagai sumber buku dan jurnal.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada April 2018 sampai selesai, tempat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Pengelasan gesek dari material dilakukan di Laboratorium Proses Manufaktur I Teknik Mesin Universitas Brawijaya
2. Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Pengujian Material Universitas Muhammadiyah Malang.
3. Pengujian mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Logam Jurusan Mesin Universitas Merdeka.
4. Pengujian distribusi kekerasan dilakukan di Laboratorium Pengujian Logam Teknik Mesin Universitas Negeri Malang

### 3.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan tiga variabel yaitu variabel bebas, variabel terkontrol, dan juga variabel terikat.

#### 3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi dari faktor-faktor yang diukur, dipilih untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diamati. Penelitian ini, menggunakan variabel bebas yaitu variasi *feed rate*: 24, 42, 55, 74, dan 98 mm/menit.



### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang mempengaruhi faktor-faktor yang diobservasi dan diukur untuk menentukan adanya pengaruh variabel bebas. Pada penelitian ini, variabel terikatnya adalah kekuatan tarik dan nilai distribusi kekerasan.

### 3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol ini merupakan variabel yang diusahakan untuk dinetralisasi oleh peneliti. Pada penelitian ini variabel terkontrolnya adalah:

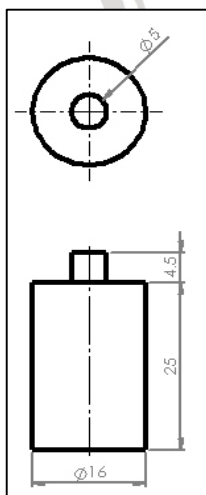
- Arah putaran *tool* dilakukan searah pada kedua sisi
- Putaran *tool* : 1842 rpm
- Diameter *shoulder* : 16 mm
- Bentuk pin : Silinder
- *Depth plunge* : 4.5 mm

## 3.4 Alat dan Bahan

### 3.4.1 Alat

#### 1. *Tool* Pengelasan

*Tool* pengelasan dalam Gambar 3.2 merupakan *tool* yang digunakan untuk melakukan gesekan pada benda kerja dan adukan terhadap daerah pengelasan. Material *tool* yang digunakan adalah baja assab spesial k dengan diameter *shoulder* sebesar 16 mm dan tinggi pin 4.5 mm dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Dimensi *tool* pengelasan  
Sumber: Dokumentasi pribadi



Gambar 3.2 Tool pengelasan

Sumber: Laboratorium proses manufaktur 1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

2. Mesin *Milling Universal*

Mesin *milling universal* dalam Gambar 3.3 dapat digunakan sebagai mesin *frais* vertikal dan mesin *frais* horizontal. Pada penelitian ini menggunakan posisi mesin *frais* vertikal dimana *tool* berada tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Mesin *frais* mempunyai fungsi pada penelitian ini untuk mencekam benda kerja, menggerakkan benda kerja dan sekaligus memutar dan menekan *tool* sehingga terjadi proses pengelasan *friction stir welding*.



Gambar 3.3 Mesin *milling*

Sumber: Laboratorium proses manufaktur 1 jurusan mesin fakultas teknik universitas brawijaya

Tabel 3.1  
Spesifikasi Mesin Universal X6328B

Unit	Satuan	Keterangan
Table size	mm	1120X260
T slot no./width/distance	no	3/14/63
Max. load of Table	kg	200
table Longitudinal travel(manual/auto)	mm	600
table Cross travel (manual/auto)	mm	270
table Vertical travel(manual/auto)	mm	300
Spindle taper		ISO40
spindle speed /step – Vertical	rpm	65-4500/8steps
spindle speed /step –Horizontal	rpm	40-1300/12steps
Max.drilling dia.	mm	30
Max.end milling width	mm	100
Max. vertical milling Dia.	mm	25
Max.tapping dia.	mm	M16
quill travel	mm	127
swivel angle of headstock	degree	±45°
vertical spindle axis to column surface	mm	100-650
vertical spindle nose to table surface	mm	100-400
horizontal spindle axis to table surface	mm	0-330
horizontal spindle axis to ram bottom	mm	175
ram travel	mm	500
Longitudinal/cross feed	mm / min	24-402/9steps
Vertical/step	mm/min	422/1step
Longitudinal/cross rapid speed	mm / min	402
Rapid Traverse vertical	mm/min	422
automatic spindle feed		0.45/0.86/1.25
main motor	kW	2.2(V/H)
(X/Y/Z) feed motor	kW	0.37(X/Y),0.75(Z)
coolant motor	kW	0.04
package dimension	cm	160X152X222 1pc/case
		220X152X222 2pcs/case
overall dimension	Cm	171X148X210
N/W,G/W	kg	1350/1500

Sumber: Manual Book Krisbow Universal Milling Machine X6328B

### 3. Mesin Pengujian Tarik

Mesin pengujian tarik pada Gambar 3.4 digunakan untuk melakukan proses pengujian tarik serta mengetahui nilai kekuatan tarik dari spesimen uji. Spesimen uji tarik disesuaikan dengan standar pengujian selanjutnya mesin akan memberikan gaya aksial terhadap spesimen. Mesin uji tarik yang digunakan memberikan elongasi 5 mm/menit. Spesifikasi alat:

- Tipe mesin = UH-X 300kN
- *Test frame load capacity* = Max 300kN (67.000 lbs)
- Maksimal *grip span* = 800 mm
- Maksimal *compression plat span* = 720 mm
- *Ram speed range* = 0,1 sampai 100 mm/min
- *Effective table dimension* = 500 x 500 mm



Gambar 3.4 Mesin pengujian tarik

Sumber: Laboratorium Pengujian Material Universitas Muhammadiyah Malang

### 4. Mikroskop Optik

Mikroskop Optik pada Gambar 3.5 digunakan untuk melihat struktur permukaan spesimen dengan jelas melalui perbesaran 200X, dan 400X.

Spesifikasi alat:

- Tipe mesin = *Eclipse E100 Nikon*
- Sistem optik = Sistem optik CFI45 *infinity*
- Berat = 6 kg
- Penerangan = *Luminescent tinggi LED illuminator*
- *Eyepieces* = CFIE 10x, 15x





Gambar 3.5 Mikroskop optik

Sumber: Laboratorium logam jurusan mesin universitas merdeka.

#### 5. Alat Uji Kekerasan

Alat uji kekerasan Gambar 3.6 digunakan untuk mengukur dan mengetahui nilai kekerasan spesimen uji. Penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan *Vickers* skala mikro. Penggunaan skala mikro karena spesimen uji berukuran kecil.

Spesifikasi alat:

- Tipe mesin = Eseway EW-412AAT
- *Rated voltage* = 240 v
- *Dimension* = 420 x 250 x 490 mm
- *Dwell time setting* = 5 detik
- *Display resolution* = 0.1 HV



Gambar 3.6 Alat uji kekerasan *micro vickers* Eseway EW-412AAT

Sumber: Laboratorium pengujian logam teknik mesin universitas negeri malang

### 3.4.2 Bahan

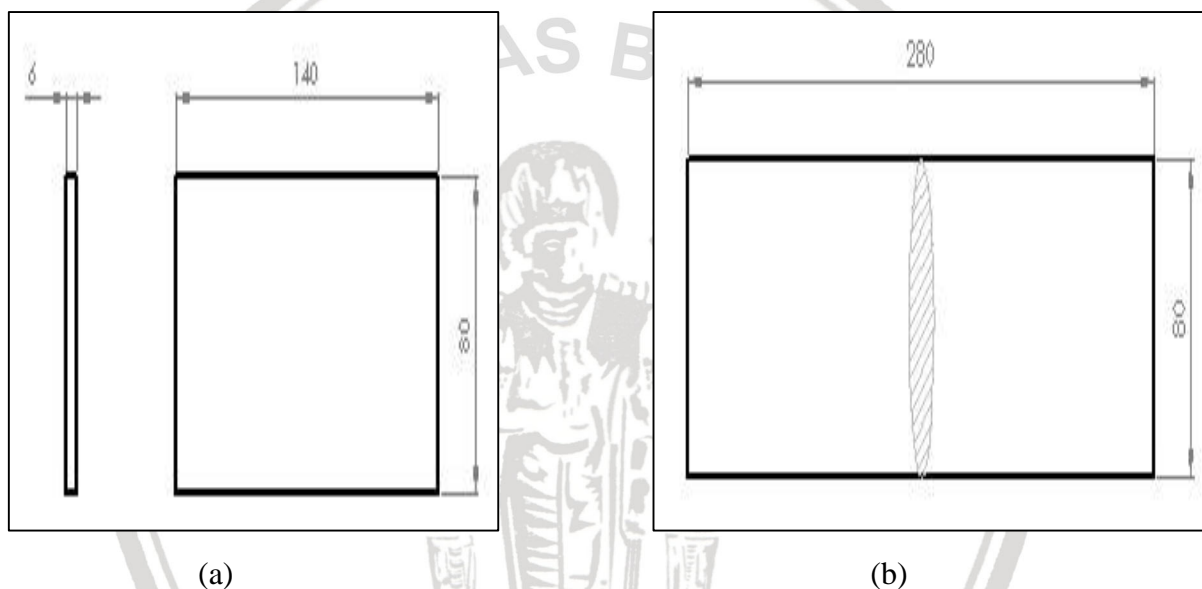
Bahan yang digunakan pada penelitian adalah Al 6061, dengan komposisi pada Tabel 3.2 dan dimensi bahan pada Gambar 3.7.

Tabel 3.2

Komposisi Aluminium A6061

Unsur	Presentase (%)
Si	0.641
Fe	0.368
Cu	0.163
Mn	0.023
Mg	0.792
Cr	0.069
Ti	0.010
Al	97.90

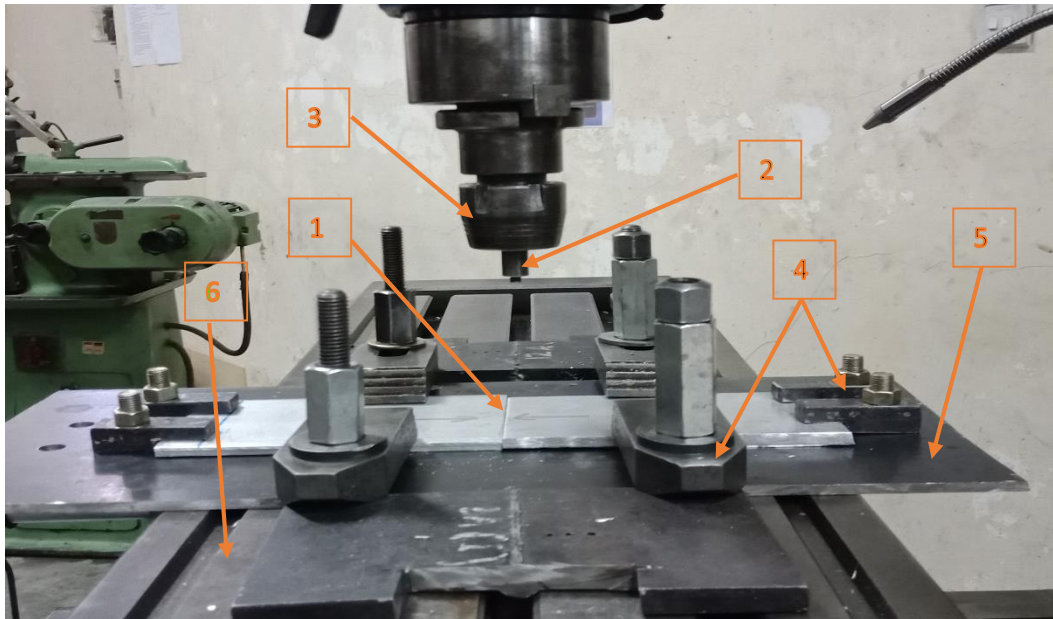
Sumber: LIPI



Gambar 3.7 Dimensi spesimen (a) sebelum pengelasan; (b) setelah pengelasan  
Sumber: Dokumentasi Pribadi

### 3.5 Instalasi Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan instalasi penelitian pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Instalasi penelitian

dengan:

1. Benda kerja
2. *Tool*
3. *Chuck tool* pengelasan
4. *Fixture* / pencekam benda kerja
5. Landasan benda kerja
6. *Table* mesin

### 3.6 Prosedur Penelitian

Sebelum dilakukan proses pengelasan terdapat prosedur penelitian, berikut ini :

1. Mempersiapkan pelat aluminium.
2. Mengukur pelat aluminium.
3. Memotong pelat aluminium sesuai desain.
4. Membentuk *tool* pengelasan sesuai dengan desain.
5. Mempersiapkan *tool* pengelasan.
6. Mempersiapkan instalasi penelitian.

#### 3.6.1 Proses *Double Friction Stir Welding*

Pengelasan *double friction stir welding* menggunakan mesin *milling universal*, dengan prosedur seperti berikut.

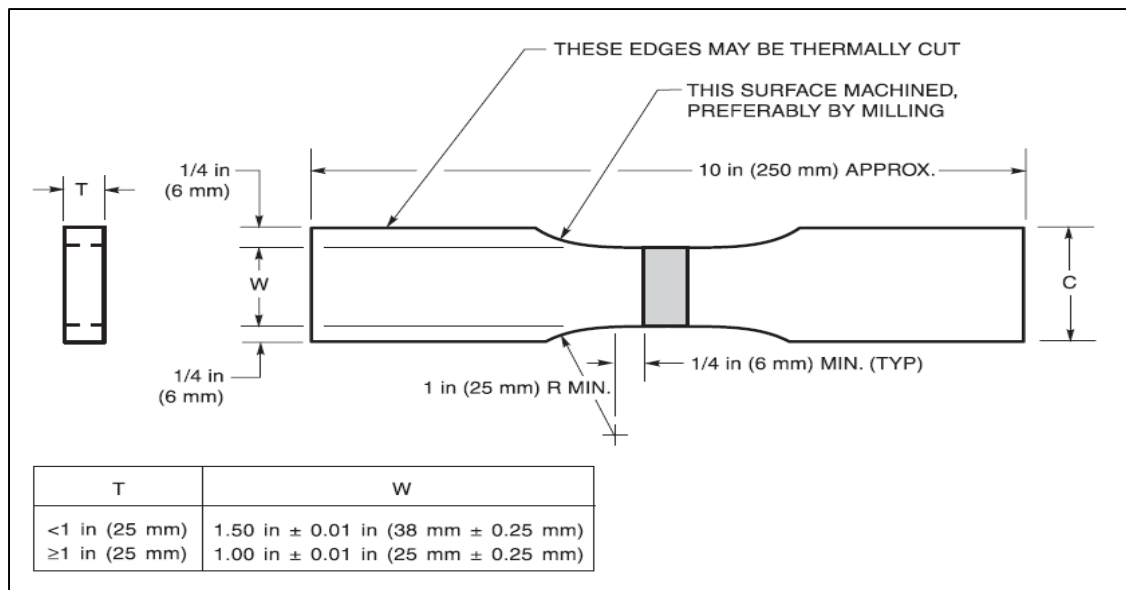
1. Mempersiapkan mesin *milling* pada posisi vertikal.
2. Mempersiapkan instalasi penelitian agar penempatan benda kerja sesuai dengan posisi pengelasan.
3. Memasang benda kerja pada instalasi penelitian yang telah dipersiapkan.
4. Memasang *tool* pengelasan pada *chuck tool* mesin *milling*.
5. Mengatur kecepatan *spindle* sebesar 1842 rpm, dan variasi *feed rate*.
6. Melakukan proses pengelasan DFSW pada sisi atas.
7. Melepas benda kerja yang sudah dilas pada sisi atas. Melakukan proses pengelasan pada sisi bawah dengan arah pengelasan yang sama dengan sebelumnya.
8. Poin 3-8 dilakukan berulang kali sesuai banyaknya variasi *feed rate* yang ditentukan.
9. Mematikan mesin dan melepaskan benda kerja yang sudah selesai di las dari instalasi penelitian atau yang mencekam benda kerja.
10. Memberikan kode atau tanda pada benda kerja sesuai parameter yang diterapkan pada proses pengelasan benda kerja tersebut.
11. Membersihkan mesin serta merapikan kembali instalasi pengelasan.

### 3.6.2 Proses Pengujian Kekuatan Tarik

Spesimen hasil pengelasan yang pada mulanya berbentuk persegi panjang kemudian dipotong menjadi spesimen uji tarik dengan standart yang ada. Spesimen yang digunakan plat aluminium dengan tebal 6 mm dibentuk sesuai dengan standart AWS B4 pada Gambar 3.9. Pengujian uji tarik dilakukan dengan menggunakan mesin pengujian tarik, dengan prosedur seperti, dibawah ini:

1. Mempersiapkan spesimen uji tarik dan mesin uji tarik.
2. Pengaturan posisi ragum pada mesin uji tarik agar posisi saat mencekam seimbang.
3. Kemudian benda kerja dijepit pada ragum mesin uji tarik.
4. Benda uji mendapatkan gaya tarik yang diawali 0 kgf dan terus bertambah hingga putus pada beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda tersebut.
5. Memcatat gaya maksimum yang tertahan oleh benda kerja dan menghitung kekuatan tarik dari data yang telah didapat menggunakan persamaan yang ada.

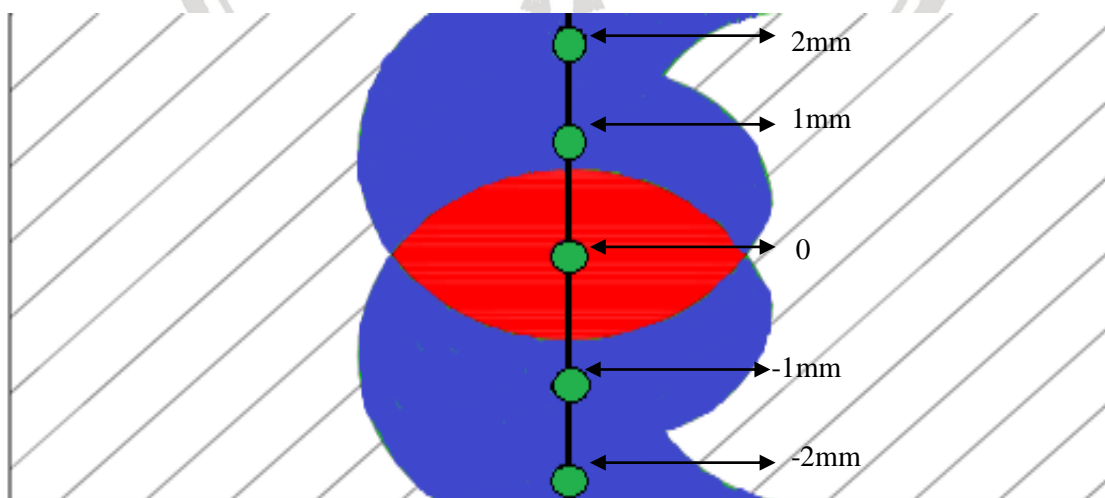




Gambar 3.9 Dimensi spesimen uji tarik  
Sumber: AWS B4 (2007)

### 3.6.3 Prosedur Pengujian *Microhardness*

1. Spesimen dipotong tepat tegak lurus arah pengelasan pada sambungan las
2. Benda kerja dibersihkan dari minyak dan debu
3. Kurangi dimensi benda kerja menjadi panjang 20 mm lebar 6 mm dan tebal 20 mm
4. Untuk hasil potongan yang tidak rata dan halus lakukan *grinding* dan *polishing*
5. Pasang benda kerja pada alat dan atur perbesaran dan fokus
6. Lakukan indentasi pertama pada titik nol sambungan
7. Hitung diagonal jejak indentasi untuk mengetahui nilai kekerasan (HV)
8. Setelah mengetahui diagonal indentasi pertama, indentasi kedua dilakukan pada interval 1 mm sebanyak dua titik ke arah atas dan dua titik ke arah bawah seperti Gambar 3.10
9. Olah data kekerasan menjadi grafik distribusi kekerasan



Gambar 3.10 Interval titik kekerasan di *weld line*

### 3.6.4 Prosedur Pengujian Mikrostruktur Hasil Sambungan Las

Pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik untuk mendapatkan visual butiran logam di daerah *interference zone*, HAZ, dan TMAZ.

1. Siapkan benda kerja hasil pengelasan dan bersihkan permukaannya
2. Benda kerja dipotong tegak lurus searah pengelasan tepat di sambungan las.
3. Bersihkan benda kerja dari minyak dan debu
4. Kurangi dimensi benda kerja menjadi panjang 20 mm lebar 6 mm dan tebal 20 mm untuk membentuk spesimen uji
5. Untuk hasil potongan yang tidak rata dan halus terlebih dahulu lakukan *grinding* dan *polishing*
6. Etsa spesimen uji dengan mengusapkan keller's reagent selama 180 detik
7. Lakukan pengujian dengan mikroskop optik pada perbesaran 400x

### 3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian digunakan agar dapat mencari pengaruh faktor *feed rate* pada proses pengelasan DFSW terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan aluminium A6061.

#### 3.7.1 Analisis Data

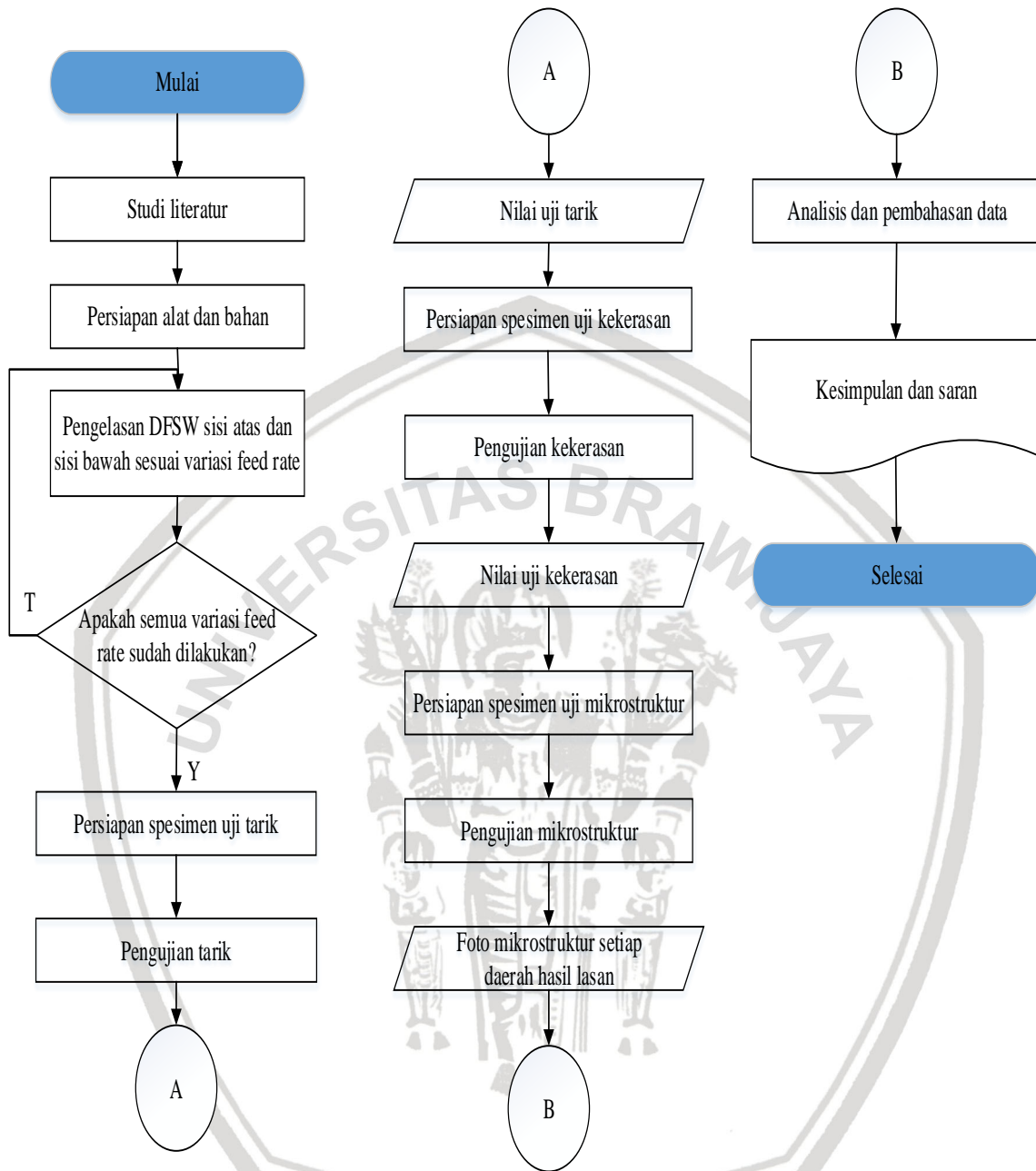
Pengujian ini meliputi uji tarik, uji kekerasan serta uji mikrostruktur pada material pelat aluminium A6061 yang dikenai proses pengelasan DFSW dengan variasi *feed rate* pengelasan. Pada setiap variasi akan dilakukan pengujian kekuatan tarik sebanyak 3 kali untuk memastikan validasi nilai uji tariknya sedangkan pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 5 titik pada setiap variasi. Data yang didapat akan dicatat dan diolah.

#### 3.7.2 Analisis Grafik

Pada analisa grafik dilakukan dengan menggunakan bantuan *microsoft excel*. Analisa grafik dilakukan dengan mengamati perubahan data pada grafik yang diperoleh dari plotting data. Pada sumbu X yaitu variabel bebas yang merupakan sudut pengelasan, dan pada sumbu Y adalah variabel terikat yaitu kekuatan tarik.

### 3.8 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.11 merupakan diagram alir pada penelitian ini.



Gambar 3.11 Diagram alir penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Uji Tarik Sambungan Las

Pada penelitian ini pengambilan data uji tarik dilakukan pada material sambungan las aluminium A6061 hasil pengelasan dengan metode *Double Sided Friction Stir Welding* (DFSW). Dimensi spesimen untuk uji tarik dibentuk berdasarkan standar uji tarik AWS B4. Setiap variasi *feed rate* yang berbeda, dilakukan satu kali pengelasan dan tiga kali uji tarik, sehingga akan diperoleh nilai rata-rata dari ketiga pengujian.

### 4.2 Pembahasan

#### 4.2.1 Hubungan Variasi *Feed Rate* Terhadap Kekuatan Tarik.

Pengujian tarik pada penelitian ini merupakan kekuatan tarik maksimum pada setiap masing – masing specimen yang telah dikonversikan ke dalam satuan MPa. Pada hasil uji tarik, patahan terjadi pada bagian sambungan pengelasan.

Tabel 4.1  
Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las DFSW

<i>Feed Rate</i> (mm/min)	Kekuatan Tarik (Mpa)			Rata- rata (MPa)	Logam Induk (MPa)
	1	2	3		
24	93.02	91.15	87.54	90.57	114.26
42	92.75	89.09	86.46	89.44	
55	89.63	88.23	87.00	88.29	
74	89.23	87.21	87.12	87.85	
98	75.37	75.06	70.90	73.78	

Pada Tabel 4.1 menunjukan data kekuatan tarik maksimum dari sambungan las DFSW, dimana pada setiap variasi *feed rate* dilakukan tiga kali pengujian, dari hasil ketiga pengujian tarik tersebut akan dirata-rata sehingga menghasilkan nilai kekuatan tarik maksimum rata-rata dari setiap variasi.

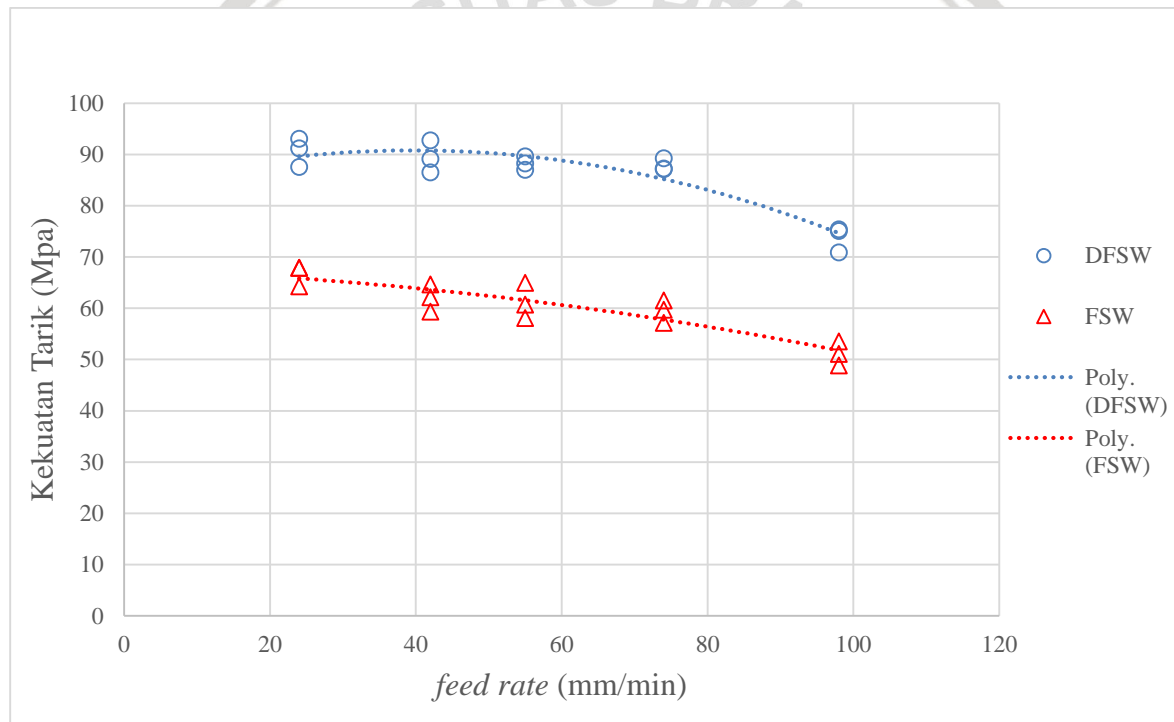


Tabel 4.2

Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las FSW

<i>Feed Rate</i> (mm/min)	Kekuatan Tarik (Mpa)			Rata – Rata (MPa)	Logam induk (MPa)
	A	B	C		
24	67.85	67.85	64.26	66.65	114.26
42	64.63	62.12	59.31	62.02	
55	64.97	60.71	58.08	61.25	
74	59.73	61.49	57.13	59.45	
98	53.54	51.10	48.83	51.15	

Tabel 4.2 menunjukkan data kekuatan tarik maksimum dari sambungan las FSW, yang setiap variasinya dilakukan tiga kali pengujian juga, dari hasil tersebut akan dirata-rata dan akan menghasilkan nilai kekuatan tarik maksimum rata-rata setiap variasi. Sehingga, dari Tabel 4.1 dan 4.2 akan dibandingkan nilai kekuatan tarik maksimum rata-rata berdasarkan grafik pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik hubungan *feed rate* terhadap kekuatan tarik sambungan las pada aluminium 6061

Pada Gambar 4.1, secara keseluruhan bahwa grafik mengalami kecenderungan penurunan nilai kekuatan tarik seiring bertambahnya *feed rate*, dan hasil pengujian nilai kekuatan tarik DFSW lebih tinggi dibandingkan dengan FSW. Pada DFSW, nilai kekuatan tarik rata-rata terbesar pada *feed rate* 24 mm/min dengan nilai 90.57 Mpa dan kekuatan tarik rata-rata terkecil pada *feed rate* 98 mm/min dengan nilai 73.78 Mpa. Sedangkan pada FSW, nilai kekuatan tarik rata-rata terbesar pada *feed rate* 24 mm/min dengan 66.65 Mpa dan kekuatan tarik rata-rata terkecil pada *feed rate* 98 mm/min dengan 51.15 Mpa.

DFSW memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan FSW, karena pada DFSW proses pengelasan dilakukan pada kedua sisi spesimen sehingga akan membentuk IZ dan deformasi plastis yang terjadi akan semakin meningkat akibat proses adukan yang berulang. Sedangkan pada *feed rate* rendah memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan *feed rate* tinggi karena berdasarkan persamaan *heat input* dibawah ini.

$$Q = \eta \frac{2 \pi N T}{v} \quad (4-1)$$

Sumber: Pew et al. (2007)

T (N-m) merupakan torsi, N (rpm) merupakan putaran *tool*, v (mm/min) merupakan *feed rate*,  $\eta$  merupakan efisiensi termal dan menurut Dickerson (2003) efisiensi termal dianggap 0.9 pada proses FSW paduan aluminium. Maka, semakin rendah *feed rate* menghasilkan *heat input* yang tinggi, saat proses pengelasan diakibatkan adukan yang lambat dan proses pendinginan lambat sehingga menghasilkan suhu *annealing* tinggi serta deformasi plastis yang terjadi semakin tinggi (Sharma, 2012). Deformasi plastis yang tinggi mengakibatkan tegangan *yield* meningkat pula, menurut Callister (2007) meningkatnya tegangan *yield* meningkatkan kekerasan material yang nilainya berbanding lurus terhadap kekuatan tarik.

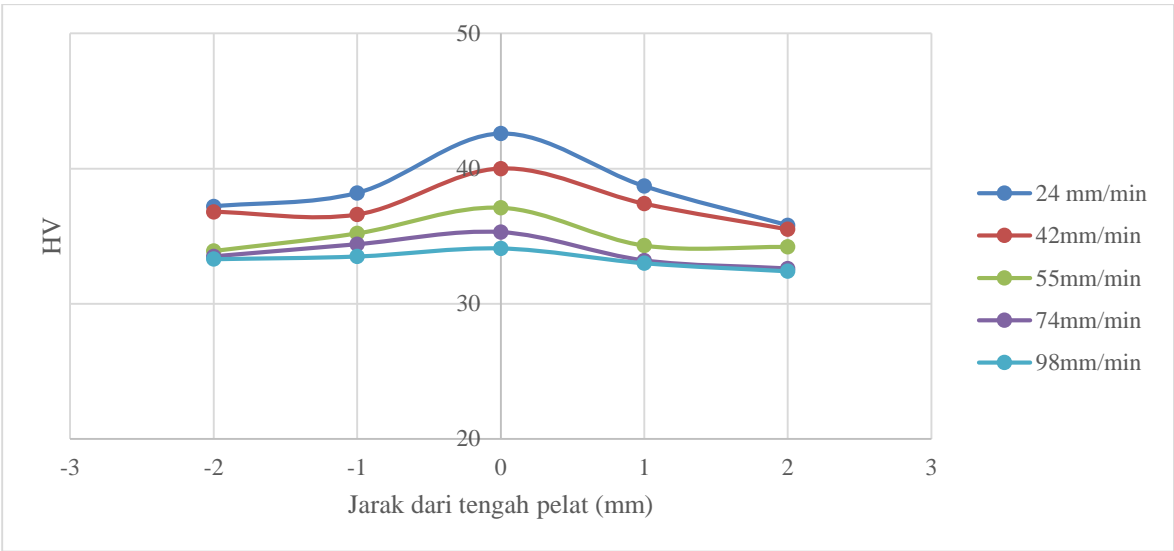
#### 4.2.2 Distribusi Kekerasan

Pada penelitian ini dilakukan pengujian distribusi kekerasan dilakukan di sepanjang garis sambungan (*weld line*) tegak lurus terhadap arah pengelasan. Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat ESEWAY EW-412AAT dengan metode *microvickers* yang dilakukan sebanyak 5 titik sepanjang garis sambungan. Tujuan dari pengujian distribusi kekerasan ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pengelasan terhadap nilai kekerasan di sepanjang garis sambungan las. Data hasil uji kekerasan pada Tabel 4.3 dan 4.4 juga sebagai data pendukung dari data hasil uji tarik, dimana secara teoritis nilai kekerasan berbanding lurus terhadap kekuatan tarik.

Tabel 4.3

Distribusi Kekerasan DFSW

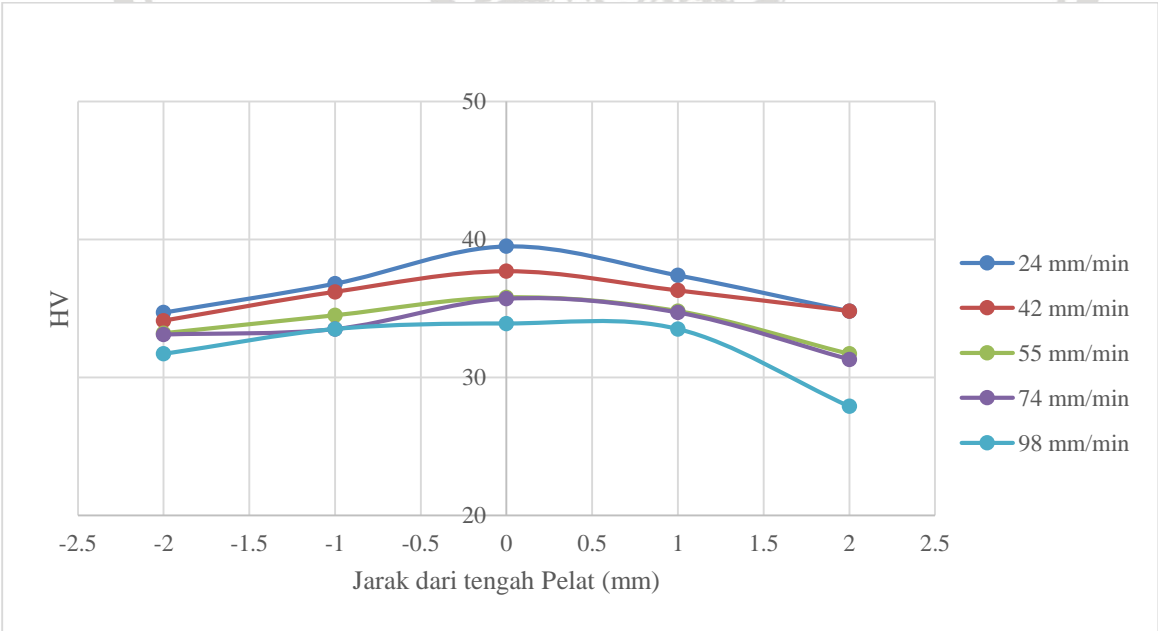
<i>Feed Rate</i> (mm/min)	Nilai Kekerasan (HV)				
	-2	-1	0	1	2
24	37.2	38.2	42.6	38.7	35.8
42	36.8	36.6	40	37.4	35.5
55	33.9	35.2	37.1	34.3	34.2
74	33.5	34.4	35.3	33.2	32.6
98	33.3	33.5	34.1	33	32.4



Gambar 4.2 Distribusi kekerasan dfsw

Tabel 4.4  
Distribusi Kekerasan FSW

Feed rate (mm/min)	Nilai Kekerasan (HV)				
	-2	-1	0	1	2
24	34.7	36.8	39.5	37.4	34.8
42	34.1	36.2	37.7	36.3	34.8
55	33.2	34.5	35.8	34.8	31.7
74	33.1	33.5	35.7	34.7	31.3
98	31.7	33.5	33.9	33.5	27.9



Gambar 4.3 Distribusi kekerasan fsw

Pada Gambar 4.2 dan 4.3 ini menunjukkan nilai distribusi kekerasan dari hasil pengelasan DFSW dan FSW sepanjang *weld line* yang dilakukan sebanyak lima titik dimana pada bagian tengah tebal plat sebagai titik acuan. Pada grafik diatas pengujian dilakukan pada titik 0 dari tebal plat, selanjutnya dari titik 0 diambil pada titik +2mm, +1mm, -1mm,-2mm. Dapat dilihat pada Gambar 4.2 bahwa nilai kekerasan paling tertinggi terdapat di daerah *IZ* atau titik 0 pada *feed rate* 24 mm/min, dan semakin meningkatnya *feed rate* nilai kekerasan di daerah *interference zone* semakin menurun. Dapat dilihat kekerasan di titik  $\pm 2$  lebih rendah dari kekerasan di titik  $\pm 1$  dan 0. Hal ini karena pada titik  $\pm 2$  merupakan bagian tepi pelat yang mengalami efek *forging* akibat gesekan *shoulder*. Gesekan *shoulder* menghasilkan panas tertinggi dari seluruh komponen pada pengelasan gesek, sehingga kekerasan material di daerah yang terkena kontak dengan *shoulder* (daerah tepi pelat) jauh lebih rendah dari kekerasan *weld nugget* pada titik  $\pm 1$  dan *interference* di 0.

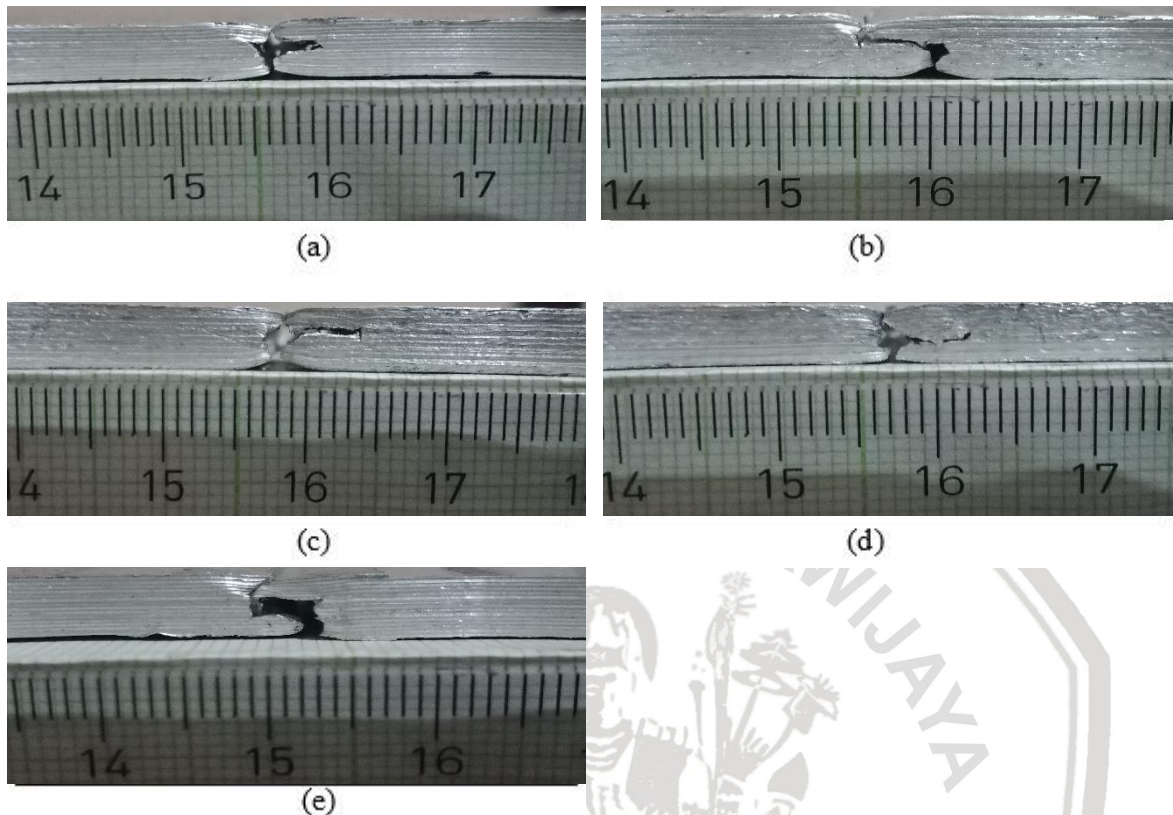
Pada Gambar 4.2 dan 4.3 *Feed rate* 24 mm/min memiliki nilai kekerasan yang tinggi seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa *feed rate* yang rendah menghasilkan panas yang tinggi saat proses pengelasan, sehingga terjadi kerapatan dislokasi serta pertumbuhan butir yang semakin banyak, kecil dan batas butir yang terbentuk juga semakin banyak. Batas butir dengan jumlah meningkat juga meningkatkan nilai kekerasan material. Bila dibandingkan FSW dengan DFSW, nilai kekerasan pada FSW memiliki nilai kekerasan yang rendah, karena pada bagian tersebut tidak terjadinya *IZ* akibat pengadukan kembali, dimana *IZ* menunjukan daerah dengan fenomena *strain hardening* yang ekstrim.



### 4.3 Data Pendukung

#### 4.3.1 Analisis Foto Hasil Patahan DFSW Pengujian Kekuatan Tarik

Analisis tampak samping patahan

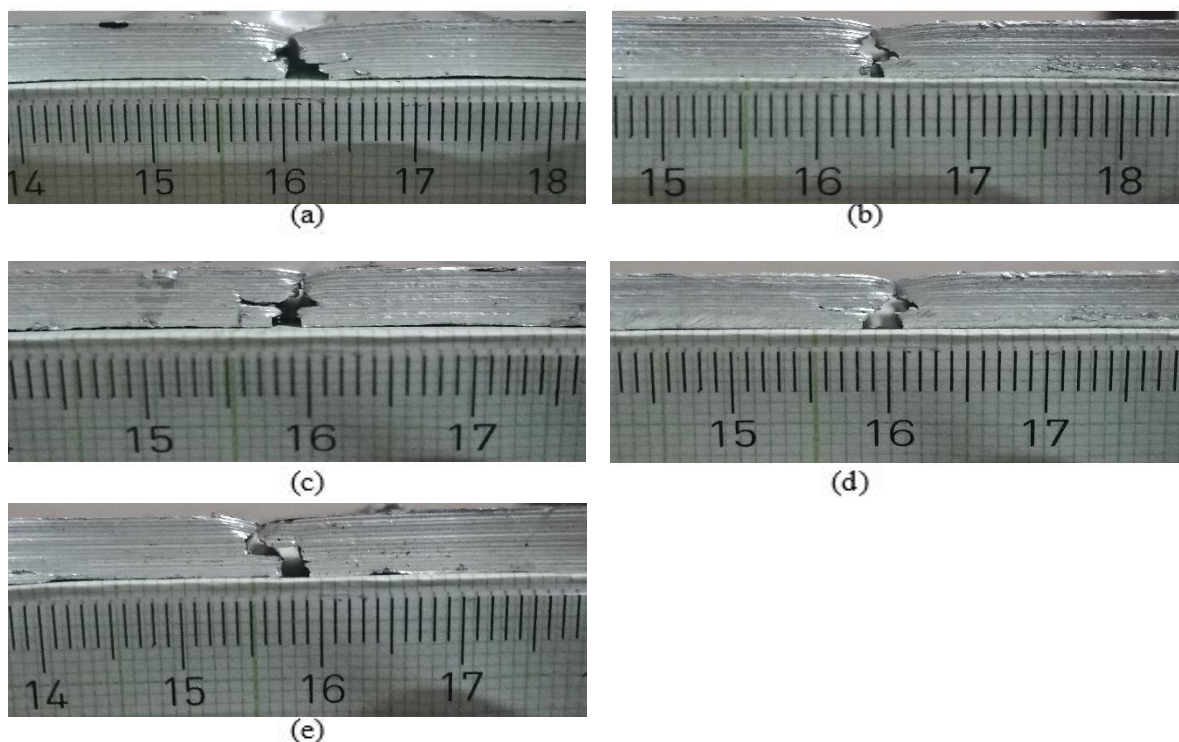


Gambar 4.4 Tampak samping patahan spesimen pengujian tarik dengan variasi *feed Rate* (a) 24 mm/min; (b) 42 mm/min; (c) 55 mm/min; (d) 74 mm/min; (e) 98 mm/min

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat patahan spesimen tampak samping, pada patahan Gambar (a), (b), (c), dan (d) terjadi patahan pada bagian atas dan bawah sambungan las yang mengalami *necking* diindikasikan bahwa pada bagian tersebut lebih ulet dibandingkan pada bagian tengah yang mengalami patahan yang lebih getas dilihat tidak terbentuknya sudut dan langsung mengalami kerusakan, hal ini disebabkan karena pada bagian tengah merupakan *IZ* akibat dari proses pengadukan kembali. Pada patahan Gambar (e), terjadi patahan yang ulet pada satu sisi di bagian atas sedangkan terjadi patahan yang getas pada bagian bawah dimana tidak terbentuknya sudut.

### 4.3.2 Analisis Foto Hasil Patahan FSW Pengujian Kekuatan Tarik

Analisis tampak samping

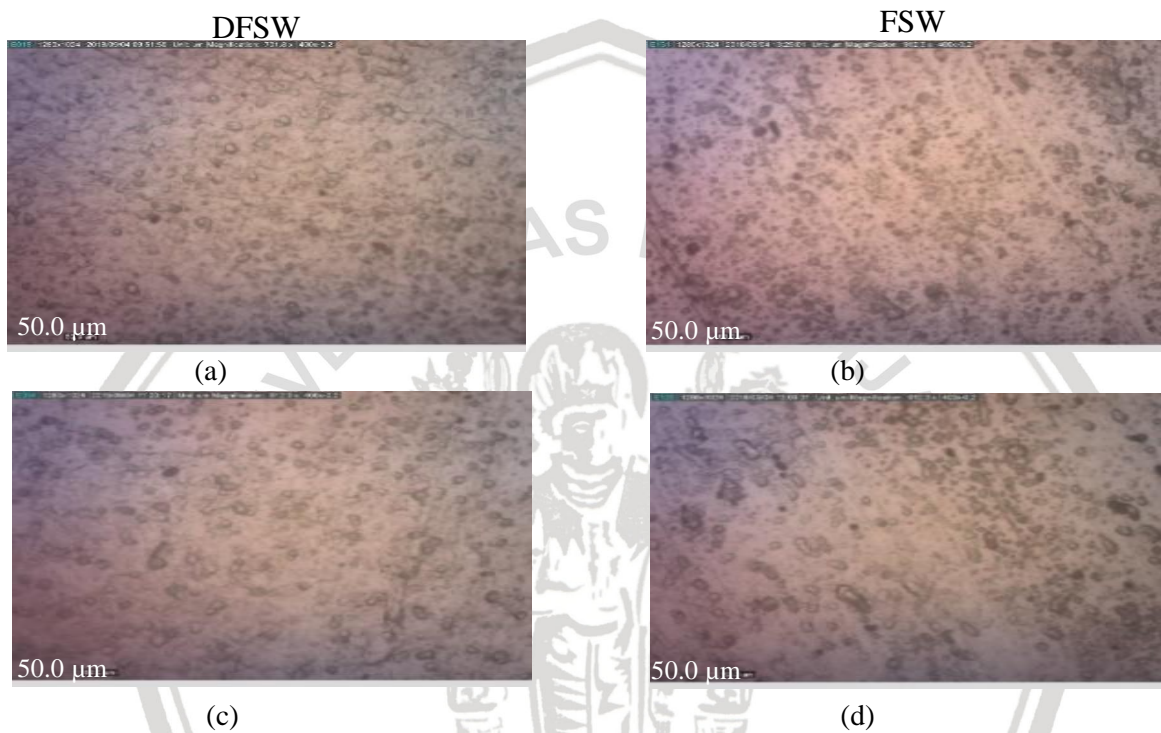


Gambar 4.5 Tampak Samping Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi *Feed Rate* (a) 24 mm/min; (b) 42 mm/min; (c) 55 mm/min ; (d) 74 mm/min; (e) 98 mm/min

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat patahan spesimen FSW tampak samping. Patahan FSW terlihat berbeda dengan DFSW. Pada patahan Gambar (a), (b), (c), dan (d) terjadi patahan pada bagian atas sambungan las yang mengalami *necking* diindikasikan bahwa pada bagian tersebut lebih ulet dibandingkan pada bagian bawah yang mengalami patahan yang lebih getas dilihat tidak terbentuknya sudut dan langsung mengalami kerusakan karena pada bagian bawah tidak terkena panas akibat dari proses adukan pada satu sisi saja. Pada patahan Gambar (e), terjadi patahan yang lebih rapih dibandingkan dengan patahan yang lainnya sehingga mengindikasikan bahwa terjadi patahan getas dimana tidak terbentuknya sudut karena penyerapan energi panas yang lebih sedikit.

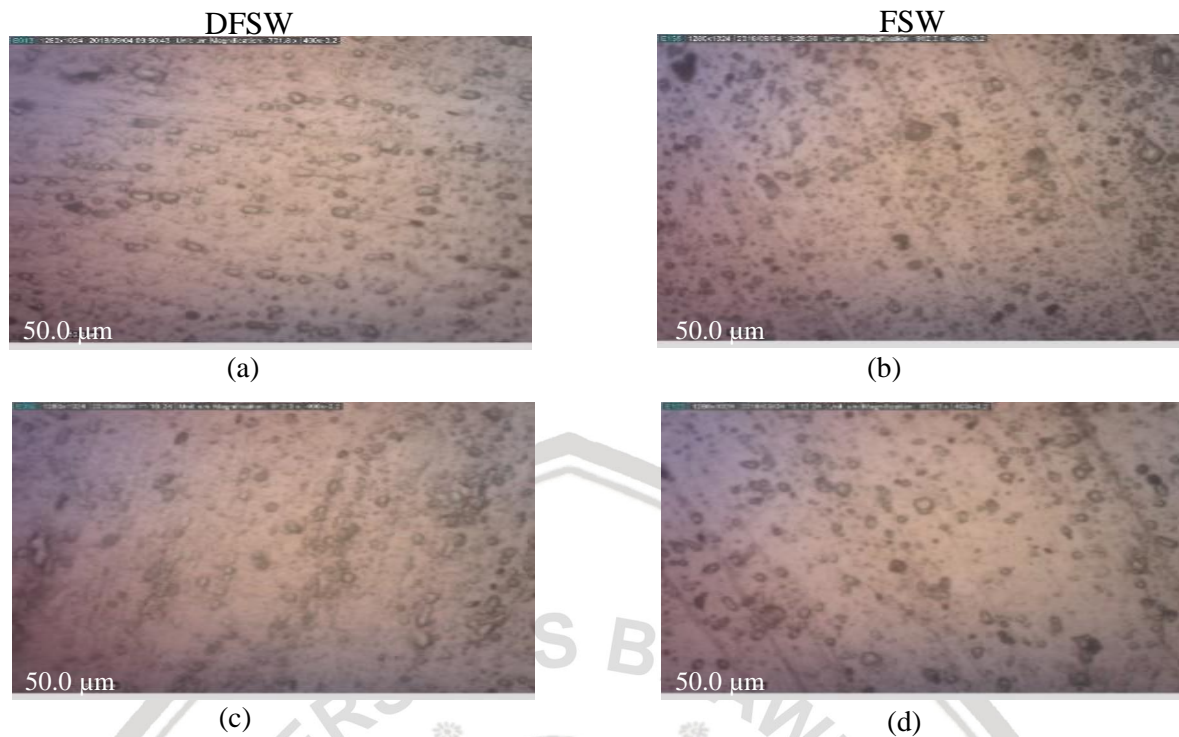
### 4.3.3 Analisis Foto Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur ini dilakukan untuk data pendukung dan mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi di daerah *IZ*, *TMAZ* dan *HAZ* akibat dari proses pengelasan dengan metode DFSW dan FSW dengan variasi *feed rate*. Pada pengujian ini spesimen telah dilakukan prosedur pengujian mikrostruktur dan diberi cairan etsa untuk memperjelas struktur logam sebelum dilakukan pengujian. Pengujian mikrostruktur ini dilakukan dengan perbesaran 400x.

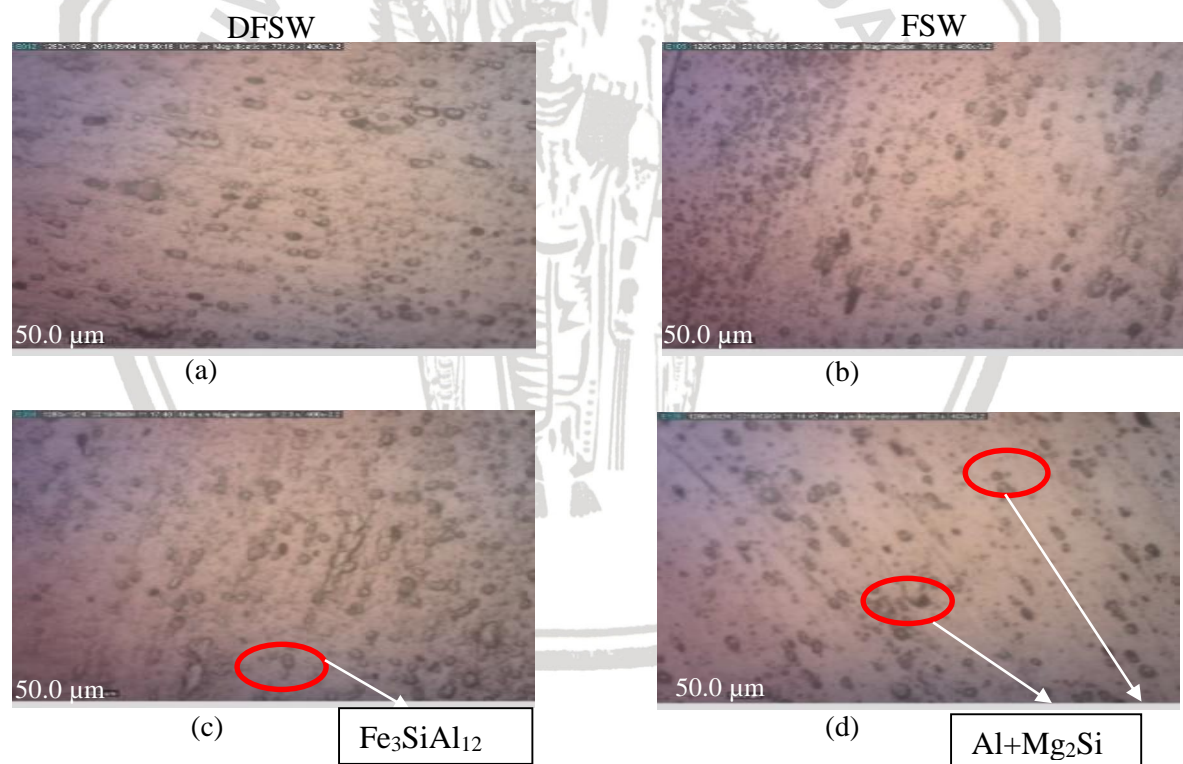


Gambar 4.6 Struktur mikro IZ (a),(b) 24 mm/min (c),(d) 98 mm/min





Gambar 4.7 Struktur mikro TMAZ (a),(b) 24 mm/min, (c),(d) 98 mm/min



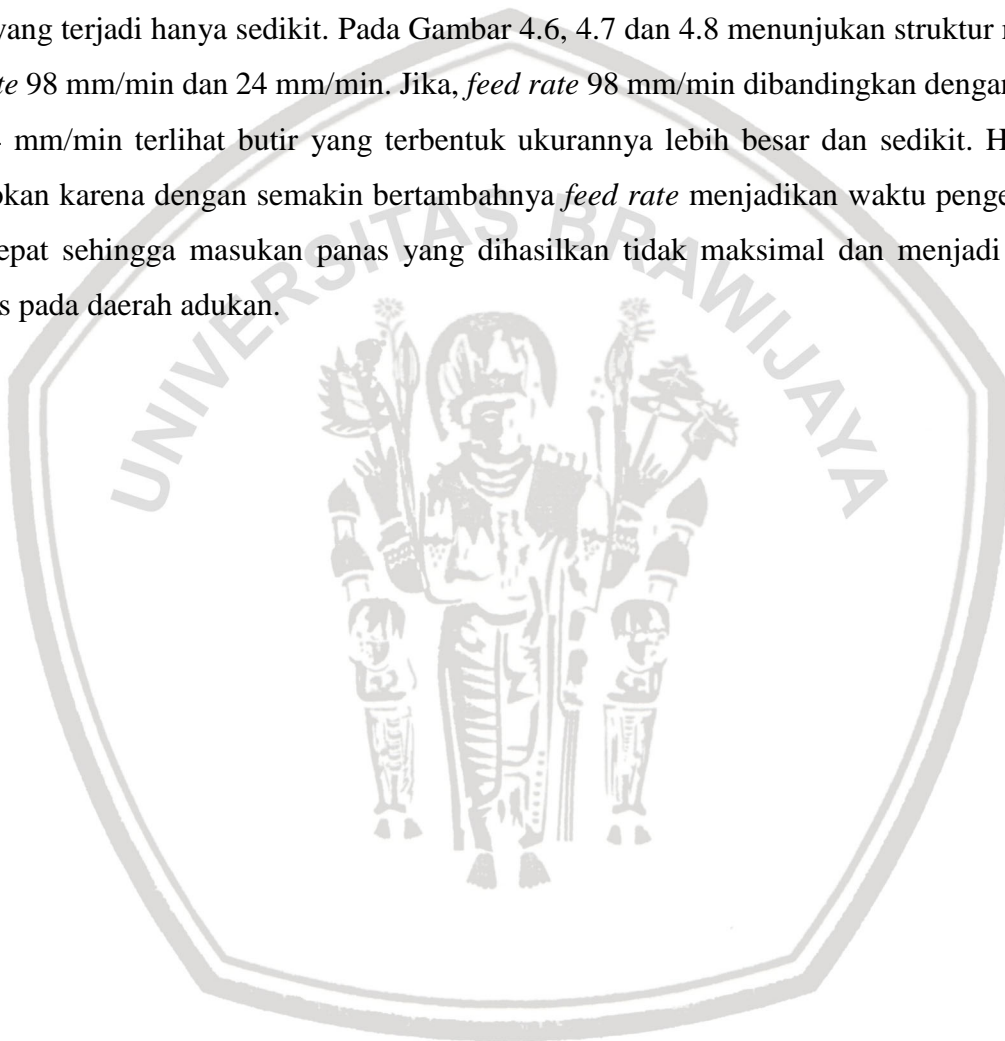
Gambar 4.8 Struktur mikro HAZ (a),(b) 24 mm/min, (c),(d) 98 mm/min

Pada Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 terdapat partikel warna hitam yang merupakan fasa  $\text{Al}+\text{Mg}_2\text{Si}$  dengan senyawa aluminium-silikon-magnesium dan warna yang terang merupakan fasa aluminium (Vander, 2004). Menurut *ASM Hand Book Metallography and Microstructures* yang berwarna abu-abu adalah  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ , muncul karena terdapat unsur Fe



dan Si yang berikatan dengan aluminium sehingga akan terbentuk fasa  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  (Hadi, 2012).

Pada Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa DFSW memiliki butir berukuran kecil dan lebih banyak dibandingkan dengan FSW disebabkan daerah *IZ* mengalami proses adukan berulang akibatnya panas tersebut terfokus pada *stir zone* dan pertumbuhan *grain* lebih banyak dan berukuran kecil (Galloway, 2012). Pada Gambar 4.7 dan 4.8 terlihat terbentuknya butir lebih sedikit dan ukurannya lebih besar dibandingkan dengan gambar 4.6 dikarenakan pada daerah tersebut tidak terpengaruh panas sehingga perubahan struktur mikro yang terjadi hanya sedikit. Pada Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 menunjukkan struktur mikro *feed rate* 98 mm/min dan 24 mm/min. Jika, *feed rate* 98 mm/min dibandingkan dengan *feed rate* 24 mm/min terlihat butir yang terbentuk ukurannya lebih besar dan sedikit. Hal ini disebabkan karena dengan semakin bertambahnya *feed rate* menjadikan waktu pengelasan yang cepat sehingga masukan panas yang dihasilkan tidak maksimal dan menjadi tidak terfokus pada daerah adukan.



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Variasi *feed rate* pada hasil sambungan las metode DFSW memiliki sifat mekanik yaitu kekuatan tarik dan distribusi kekerasan yang lebih baik dibandingkan dengan metode FSW yang ditunjukkan oleh penurunan nilai kekuatan tarik hasil sambungan dan distribusi kekerasan. Semakin bertambah *feed rate* terjadi penurunan nilai kekuatan tarik dan nilai distribusi kekerasan dikarenakan masukan panas yang rendah akibatnya panas tersebut tidak terfokus di zona aduk (*stir zone*). Nilai distribusi kekerasan pada bagian tengah pelat yang memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan daerah *weld nugget* pada titik  $\pm 2$  mm dan  $\pm 1$  mm.

Pengaruh variasi *feed rate* terhadap sifat mekanik juga didukung oleh analisis patahan spesimen, struktur patahan ulet terjadi di bagian atas dan bawah permukaan, lalu struktur patahan getas terjadi di IZ yang mengindikasikan perbedaan kekuatan material. Hasil foto struktur mikro DFSW lebih halus, kecil dan rapat dibandingkan dengan FSW pada setiap daerah akibat proses pengelasan yang dilakukan berulang sehingga panas yang dihasilkan lebih tinggi.

### 5.2 Saran

1. Pengujian tarik dengan penempatan *ekstensometer* tepat pada hasil sambungan untuk mengetahui secara spesifik pertambahan panjang di daerah tersebut.
2. Pemilihan interval titik kekerasan yang lebih tepat pada sepanjang *weld line* untuk tiap variasi.
3. Proses pemesinan dilakukan secara hati-hati untuk mengurangi resiko kerusakan pada benda uji.
4. Penggunaan etsa yang tepat dan disesuaikan dengan jenis paduan material untuk mendapatkan hasil yang maksimal.
5. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menghitung besar butir rata-rata menggunakan standar yang umum untuk mencegah subjektivitas dalam pengujian.



## DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Metals Handbook Committee. 2004, *Metallography and Microstructures*, Volume 09, ASM International, The Materials Information Company.
- American Welding Society (AWS). 1976. *AWS Welding Handbook Seventh Edition: Fundamentals of Welding*. Miami: American Welding Society.
- Callister, William D., dan Rethwisch, David G. 1223. *Fundamentals of Materials Science and Engineering an Integrated Approach Third Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Dickerson, T. 2003. *Heat Flow Into Friction Stir Welding Tools*. Utah. Park City. USA
- Groover, Mikell P. 2011. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc.
- Kumar, Ram., Varghese Saji. 2012. *A Comparative Study of the Mechanical Properties of Single and Double Sided Friction Stir Welded Aluminium Joints*. India: Elsevier.
- Nurhafid, Aji., Jokosisworo dan Budiarto. 2017. *Analisa Pengaruh Perbedaan Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Aluminium 6061 Metode Pengelasan Friction Stir Welding*. Semarang: Universitas Diponegoro
- Pew, J.W., Nelson, T.W. 2007. *Torque Based Weld Power Model For Friction Stir Welding*. Sci. Technol.
- Sedmak, Aleksandar S., et al. 2016. *Heat Input Effect Of Friction Stir Welding On Aluminium Alloy AA 6061-T6 Welded Joint*. Serbia: University of Belgrade.
- Shalin. 2018. *Experimental Analysis On Effect Of Tool Transverse Feed, Tool Rotational Speed And Tool Pin Profile Type On Weld Tensile Strength Of Friction Stir Welded Joint Of AA 6061*. India: Elsevier
- Sharma. 2018. *Role of Hybrid Tool Pin Profile on Enchancing Weldin Speed And Mechanical Properties of AA2219-T6 Friction Stir Welding*. India: Elsavier.
- Sofyan, Bondan T. 2010. *Pengantar Material Teknik*. Jakarta: Salemba Teknika
- Sudrajat, Angger, Sumarji. 2012. *Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 Dengan Metode Friction Stir Welding (FSW)*.
- Surdia, Tata dan Saito, Shinroku. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Wijayanto, Jarot., dan Anelis Agdha. 2010. *Pengaruh Feed Rate Terhadap Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 6110*. Yogyakarta: Institut Sains & Teknologi Akprind
- Wijayanto, Jarot., dan Mujiarto Sigit. 2010. *Friction Stir Welding/FSW pada Paduan Aluminium seri 6061 dan 2024*. Yogyakarta: Institut Sains & Teknologi Akprind
- Wirjosumarto, Harsono dan Okumura, Toshie. 2008. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita.



